

22
29°



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES
CUAUTITLAN**



**“ MODELADO, CONTROL Y SENTIDOS
EN CADENAS MANIPULADORAS “**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

P R E S E N T A:

JOSE FRANCISCO MIRA BECERRA

ASESOR: IME YOLANDA BENITEZ TREJO

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

1993

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

MODELADO CONTROL Y SENTIDOS EN CADENAS MANIPULADORAS

CONTENIDO

INTRODUCCION	1
I-1 DESARROLLO HISTORICO de la CIBERNETICA	1
I-2 FUNDAMENTOS, ESTRUCTURA, y COMPONENTES de los MANIPULADORES	3
I-3 MECANICA del MANIPULADOR: CINEMATICA y DINAMICA	6
I-4 PROGRAMACION y LENGUAJES del MANIPULADOR	7
I-5 PERCEPCION de las MAQUINAS	8
I-6 INTELIGENCIA ARTIFICIAL	9
I-7 FUTURO de las MAQUINAS "LISTAS"	9
CAPITULO UNO: GEOMETRIA DEL MOVIMIENTO	11
1-1 ORIENTACION y POSICION del MANIPULADOR	11
1-2 GEOMETRIA de la POSICION-ORIENTACION	14
1-3 SOLUCION de la POSICION-ORIENTACION	28
CAPITULO DOS: MECANICA DE FUERZA-MOVIMIENTO	36
2-1 ECUACIONES de LAGRANGE-EULER	36
2-2 CADENA MANIPULADORA con Dos g.d.l.	42
CAPITULO TRES: CONTROL DEL MANIPULADOR	43
3-1 PRELIMINARES MATEMATICOS	43
3-2 ALGUNAS ESTRATEGIAS de CONTROL	48
3-3 CONTROL HIBRIDO	62
3-4 CONTROL para una CADENA con Dos g.d.l.	63

MODELADO CONTROL Y SENTIDOS EN CADENAS MANIPULADORAS

CONTENIDO

CAPITULO CUATRO: PROGRAMACION DE MANIPULADORES	66
4-1 CARACTERISTICAS de LENGUAJES a NIVEL de MANIPULADOR	66
4-2 CARACTERISTICAS de LENGUAJES a NIVEL de TAREAS de TRABAJO	67
CAPITULO CINCO: TRANSDUCTORES Y PERCEPTORES NO VISUALES	69
5-1 TRANSDUCTORES de TACTO, ESFUERZO y PROXIMIDAD	69
5-2 MAQUINAS PARLANTES y ORDENADAS por VOZ	72
CAPITULO SEIS: PERCEPCION DE IMAGENES EN LAS MAQUINAS	76
6-1 TRANSDUCTORES para DIGITALIZACION de IMAGENES	76
6-2 IMAGENES DIGITALIZADAS con ANIMACION	80
6-3 ESTRATEGIAS y ALGORITMOS de PERCEPCION	82
CAPITULO SIETE: INTELIGENCIA ARTIFICIAL	96
7-1 INTELIGENCIA ARTIFICIAL en las MAQUINAS	96
7-2 INGENIERIA del CONOCIMIENTO y SISTEMAS EXPERTOS	97
7-3 NEURONAS ARTIFICIALES	99
7-4 DISEÑO de un SIMULADOR de REFLEJO CONDICIONADO	101
REFERENCIAS.	104

INTRODUCCION

I-1 DESARROLLO HISTÓRICO DE LA CIBERNÉTICA

La palabra robot proviene de robota, que en el Checoslovaco significa trabajo forzado o esclavo. En 1921 el Checoslovaco Karel Capek en la novela llamada R.U.R. (Robots Universales de Rossum) introdujo esta palabra al inglés. Para esta novela los robots son máquinas que sustituyen al hombre con la ventaja de trabajar incansablemente. En la trama original fueron hechas para beneficio de los trabajadores humanos, pero al paso del tiempo las mismas se rebelaron y acabaron con nuestra raza.

Los trabajos iniciales que condujeron a los manipuladores actuales, son aquellos hechos en la post segunda guerra mundial. A finales de los 40's, los programas de investigación comenzaron en los E.U.A., en The Argonne National Laboratories de Oak Ridge, Tennessee. Ahí se desarrollaron los primeros manipuladores para el manejo de materiales radioactivos, estos sistemas se les conoce como "maestro-esclavo", ya que el manipulador (esclavo), lo único que hace es reproducir el movimiento del operador (maestro), este sistema tuvo la desventaja de que el operador no sabía la fuerza que aplicaba a la pieza durante la manipulación. Lo que se hizo es añadir realimentación de la fuerza aplicada a la pieza, de tal forma que el operador pudiera conocerla.

El siguiente paso fueron sistemas más sofisticados, los cuales proporcionaban operaciones repetitivas y autónomas mediante sistemas de control basados en computadora. A mediados de los 50's, George C. Devol desarrolló un sistema llamado "dispositivo articulado de transferencia programado", un manipulador cuya operación puede ser cambiada y reprogramada para seguir una secuencia de movimientos determinados por el programa. Un aporte adicional proporcionado por George Devol, es de que asociado con Joseph F. Engelberger fundó la primer compañía de autómatas, e introdujo el primer manipulador industrial en 1959 por medio de su compañía la Unimation Inc. La clave del sistema es el uso de una computadora en conjunto con un manipulador, para producir una máquina que podía hacer una amplia variedad de trabajos automáticamente, a diferencia de las otras máquinas, las cuales no podían ser reprogramadas para hacer otro tipo de tareas.

Usando realimentación con sensores, los manipuladores incrementaron su poder como herramienta, tal como se hizo patente en 1960. A principios de esa década, H.A. Ernst reportó en [1962], el desarrollo de una mano mecánica con sensores táctiles controlada por computadora. Este dispositivo llamado MH-1, podía "sentir" cajas y usar esta información para poder apilarlas sin la ayuda del operador. El sistema manipulador consistía de un brazo ANL modelo 8, con 6 g.d.l. controlado por una computadora TX-O. Posteriormente como complemento a tal diseño, se le añadió una cámara de televisión y comenzó la investigación de percepción de máquinas. Durante ese período Tomovic y Boni desarrollaron un prototipo de mano con sensores de presión, estos al sentir un objeto mandaban una señal de control para iniciar el cierre de la mano, la cual tenía dos formas de "agarrar". Posteriormente vino otro avance el cual informaba a la computadora acerca de la forma y peso del objeto tomado.

INTRODUCCION

Para el año de 1963, la AMF (American Machine & Foundry Co.) introdujo en el mercado el sistema comercial VERSATRAN, en este mismo año varios diseños de manipuladores fueron presentados: brazo Roehampton y brazo Edinburgh.

Al final de los 60's, en el Artificial Intelligence Laboratory en Stanford, McCarthy et al [1968] reportó el desarrollo de computadora con manos, ojos y oídos, esto es: manipuladores, cámaras de televisión, y micrófonos. Tal sistema demostró que podía "ver" cajas sobre una mesa, reconocer mensajes hablados y manipularlas de acuerdo a las instrucciones que le daban. En ese periodo se inició el estudio del problema de la dinámica del manipulador por medio del control por computadora: Pieper[1968]. Ya para 1971 Kahn y Roth, analizaron el control y dinámica del manipulador con una estructura de control cercano al tiempo mínimo.

Otros países como el Japón comenzaron a ver el potencial de los manipuladores industriales. Para principios de 1968 Kawasaki Heavy Industries consiguió una licencia de Unimation para sus sistemas. Un desarrollo singular fué hecho en 1969, cuando General Electric desarrolló un camión andante para el ejército de los Estados Unidos. En ese mismo año, el manipulador Boston fué desarrollado, y un año después se diseñó el manipulador Stanford equipado con cámara de televisión. Para el año de 1974, Cincinnati Milacron introduce su primer manipulador industrial llamado "The Tomorrow Tool" αT^3 . Durante los 70's un gran trabajo de investigación se desarrolló en el uso de sensores con el fin de facilitar las operaciones de manipulación. En la universidad de Stanford Bolles y Paul en 1973, usando realimentación de fuerza y visión artificial, un manipulador Stanford, y una computadora PDP-10 pudieron armar bombas de agua sin ayuda externa de un humano. IBM en 1975 desarrolló un manipulador para armar 20 piezas de una máquina de escribir mediante un control dotado con sensores de fuerza y contacto. Para el año de 1974, el MIT contribuyó también en el desarrollo de los autómatas en el campo de la inteligencia artificial.

TABLA 1-1-2 DESARROLLOS IMPORTANTES DE LA CIBERNÉTICA

Fecha	Aportación a la Cibernética
1805	Construcción de una muñeca dibujante por H. Maillardet.
1946	George C. Devol, desarrolla un controlador magnético programable.
1951	Se inventan los manipuladores para el manejo de materiales radioactivos.
1959	Primer autómata comercial de control por levas y apagadores: Planet Corp.
1960	Primer manipulador "UNIMATE", basado en la máquina de George C. Devol.
1961	Es instalado un manipulador Unimate en Ford Motor Co.
1964	La compañía Trallfa instala el primer brazo pintor.
1966	Primer autómata móvil con visión, y sensores de tacto: "Shakey".
1971	"Brazo Stanford", manipulador ligero movido por motores eléctricos.
1973	Primer lenguaje de programación de robot: WAVE, seguido en 1974 por AL.
1974	Es introducido el manipulador T^3 controlado por computadora.
1974	ASEA introduce un manipulador industrial movido eléctricamente: IRB6.
1978	Nace el robot Programmable Universal Machine for Assembly: PUMA.
1979	Nace el robot Selective Compliance Arm for Robotic Assembly: SCARA.
1980	Usando visión artificial, un autómata tomaba objetos en forma aleatoria, en la Universidad de Rhode Island.
1981	Manipulador de transmisión directa de la Universidad Carnegie-Mellon.
1982	IBM, introduce al manipulador cartesiano RD-1, y el lenguaje AML.

INTRODUCCION

La tabla anterior muestra un resumen de los hechos trascendentales de la cibernética. Actualmente se puede ver el campo de la cibernética más amplio de como se veía hace apenas algunos años. Esta área es interdisciplinaria, ya que para poder diseñar tales sistemas debe emplearse:

- i) Mecánica clásica en cinemática y dinámica.
- ii) Control.
- iii) Sensores.
- iv) Computadoras, sistemas digitales, programación y lenguajes.
- v) Inteligencia de máquinas.
- vi) Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

I-2 FUNDAMENTOS, ESTRUCTURA, Y COMPONENTES DE LOS MANIPULADORES

El nombre de robot es puramente histórico, ya que este no dice nada sobre el concepto actual de manipulador. Se define al manipulador como una cadena cinemática abierta de enlaces idealmente rígidos, de funciones múltiples, reprogramable, diseñado para mover materiales, herramientas, piezas, y en general dispositivos especializados, a través de movimientos variables y programados para lograr una amplia variedad de tareas. Bajo la definición anterior, es claro que solo bastan sensores de posición en las uniones para ser manipulador. Un manipulador para lograr su control no está obligado a tener una computadora, tal es el caso de los manipuladores controlados por levas y conmutadores. Es posible grabar la sucesión de los movimientos con sistemas magnéticos sin el uso de computadora. Si es necesario recordar, y almacenar en una computadora los algoritmos de todo el proceso de la tarea que debe realizarse, se asocia al manipulador con la inteligencia. Si además este reconoce escantillones, y es un poco listo, ya se considera autómatas o sistema cibernético.

Un manipulador industrial de propósito general formado por enlaces rígidos, conectados por uniones de revoluta, por uniones prismáticas o combinaciones de estas, es controlado por computadora. Un extremo de la cadena de enlaces está firmemente sujeto a su base de soporte, y el otro extremo es libre para poder insertarle la herramienta o el dispositivo encargado de efectuar su trabajo: soldadora de puntos, pistola de pintar, pinza sujetadora, etc. Este extremo será llamado porta-herramientas.

Mecánicamente hablando un manipulador está formado por un marco principal, un subensamble de muñeca más la herramienta de trabajo. El manipulador se diseña para que la herramienta alcance un punto específico dentro de su espacio o volumen de trabajo. El espacio de trabajo es todo el volumen alcanzado por la herramienta del manipulador. Este depende de la geometría del manipulador número de grados de libertad, tipo de uniones que posea, y otras limitaciones de tipo mecánico.

La muñeca del manipulador posee en general tres grados de libertad, y la combinación de estos posicionan el porta-herramientas. Los tres movimientos rotatorios giro, levante, y derrape, ubican la herramienta con su orientación en el punto deseado, para una tarea específica.

Esta configuración es la adoptada actualmente por varios manipuladores del tipo industrial de manufactura en serie, tal como el T³ y el PUMA. Las figuras I.2-1 y I.2-2, muestran tales manipuladores.

INTRODUCCION

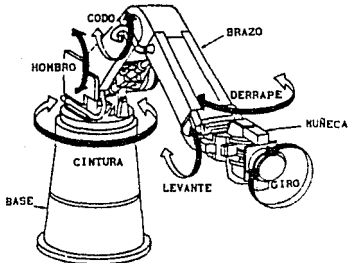


Figura I.2-1 Cincinnati Milacron T¹

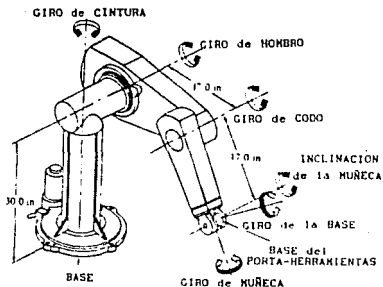
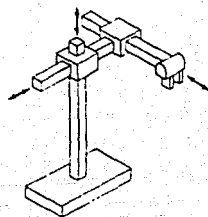


Figura I.2-2 PUMA serie 560

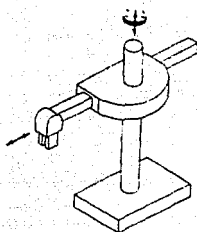
Muchos manipuladores industriales disponibles comercialmente, son usados ampliamente en tareas de ensamble, manufactura, armado de partes, prótesis, manejo de materiales peligrosos, soldadura de arco y puntos, pintado en aerosol, armamento, y exploración espacial. Cualquiera de estos manipuladores debe encontrarse en alguna de las siguientes categorías, o sus combinaciones.

- 1) Coordenadas Cartesianas, este es un tipo de manipulador que solo tiene movimiento a lo largo de los tres ejes cartesianos, (x, y, z). Dentro de esta categoría están los RS-1 de IBM, y los Sigma de Olivetti.
- 11) Coordenadas Cilíndricas, es un manipulador con un movimiento lineal a lo largo de los ejes (x, z). Con movimiento rotatorio para el plano xy, y con un eje de giro z, tal como lo hace Versatran 600 de Prab Co.
- 111) Coordenadas Esféricas, tiene movimiento lineal a lo largo de (x). Posee movimiento rotativo en el plano xy, con centro en z. Y además tiene una rotación para el plano xz, girando sobre el eje y. Son un ejemplo estos los manipuladores Unimate 2000B, de Unimation Inc.
- 1v) Coordenadas Articulas o de Revoluta, tiene como ejes de rotación los ejes coordenados. Dentro de este tipo están los PUMA de Unimation Inc. y los "The Tomorrow Tool" de Cincinnati Milacron.

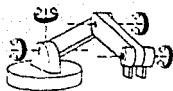
En la figura I-2.3, se muestran las anteriores cuatro clasificaciones. Estas cuatro categorías se basan en el movimiento del manipulador, también es posible clasificarlos de acuerdo al tipo de actuadores empleados en las uniones: hidráulicos, eléctricos, neumáticos, etc. La gran mayoría de los manipuladores son máquinas posicionales controladas por computadora, siguiendo las instrucciones de un programa previamente elaborado por el usuario que contiene la sucesión de los movimientos que debe efectuar la máquina, esto se hace en una caja de tamaño manual llamada caja de control-enseña. Este tipo de manipuladores poseen pocos o ningún sensor para obtener información del medio les rodea, ya que estas máquinas son empleadas en tareas relativamente simples y repetitivas, tal es el caso de aplicaciones de "pick and place" (toma y coloca).



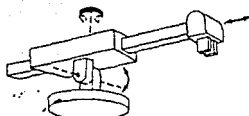
Cartesiano



Cilíndrico



Articulado



Esférico

Figura 1.2-3 Clasificación de brazos de acuerdo a su movimiento.

Muchas áreas de investigación están abiertas para la cibernética, algunas de ellas son: controladores no convencionales, inteligencia artificial y sistemas expertos, visión, reconocimiento de escantillones ya sea visuales o auditivos, máquinas parlantes por el método de fonemas y digitalización de voz.

Dentro de los componentes de las máquinas están los sistemas de control con leyes no convencionales, incluyendo el sistema digital, y los sensores. Si se quiere un control efectivo, se debe tener un buen modelo matemático de ecuaciones I-D, independientemente de la estrategia de control empleada para lograr el movimiento y posición deseada. Los sistemas de control digital, incluyen los puertos de E/S, interfaces A/D-D/A, μ P, memorias y periféricos.

Los sensores mínimos necesarios son los de posición, y estos en su forma más sencilla, son potenciómetros colocados en las uniones. Se tienen dos sensores para la posición, uno es el absoluto el cual muestra la posición de la unión en cualquier instante, sin necesitar alguna referencia inicial, el otro sensor es conocido como incremental y necesita de la referencia inicial. Para la velocidad se mide desde un punto fijo dentro del sensor de posición. Los sensores de tipo incremental se basan en medir a partir de un punto inicial del manipulador, el cual se le conoce como la posición casa o "home". El sensor incremental, se encuentra en un manipulador del tipo académico como lo es el Rhine XR-3. Si el sensor es de potenciómetro, es necesario usar una interfase A/D para poder utilizarlo en los sistemas de computo. También es posible usar sensores del tipo codificador, este convierte directamente la señal de posición en su equivalente digital sin el uso de convertidor A/D, dentro de los sensores codificados existen el absoluto y el incremental también.

INTRODUCCION

El absoluto, es una rueda codificada en binario, y puede usarse un código conocido: Gray, o cualquier otro. El sensor de tipo incremental necesita su referencia para poder medir la posición o la velocidad, la desventaja de este último sensor es de que si se interrumpe la alimentación eléctrica del manipulador, este no "recuerda" su última posición, y al momento de encenderlo generalmente se programa para retornar a la posición de casa. Otro sensor de velocidad es el tacogenerador cuyo funcionamiento necesita el uso de hardware A/D.

Los actuadores son otros elementos de los manipuladores, son pistones de tipo hidráulico, de vacío o de aire comprimido. Se usan para mover manipuladores de servicio pesado, tienen la desventaja de ser ruidosos, tener escapes de fluidos, necesitan periféricos: bombas, manómetros, compresores, y tuberías.

Otra forma de mover las articulaciones es por medio de motores eléctricos, se pueden usar de CD, AC y de pasos. Para manipuladores que operan con cargas ligeras se prefieren motores eléctricos.

I-3 MECÁNICA DEL MANIPULADOR: CINEMÁTICA Y DINÁMICA

Para mover adecuadamente cualquier manipulador, se considera el modelo matemático de su mecánica. Este se obtiene mediante un análisis de mecánica clásica, así se encuentran las leyes que lo gobiernan, sin considerar las fuerzas que causan a tal movimiento. Una vez logrado esto, se modela dinámicamente, donde ya intervienen las fuerzas y momentos que causan el desplazamiento. Se presentan dos enfoques:

Cinemática, geometría del movimiento, la cual se puede dividir en:

- i) Geometría de la posición y orientación.
- ii) Solución de la posición y orientación.

Generalmente la solución de posición y orientación puede ser resuelta por varias técnicas. Los métodos más comunes son álgebra de matrices, métodos numéricos, y un enfoque geométrico. Es importante notar que no siempre puede lograrse la posición o la orientación deseada debido a la morfología propia del manipulador, cuando esto ocurre se dice que la solución del manipulador es una configuración singular.

Dinámica, mecánica de fuerza-movimiento, que tiene tres enfoques:

- i) Ecuaciones de Lagrange-Euler.
- ii) Ecuaciones de Newton-Euler.
- iii) Ecuaciones generalizadas de movimiento de D'Alembert.

Considerando la mecánica de fuerza-movimiento, esta se refiere a las leyes dinámicas del manipulador que gobiernan su movimiento en base a los pares y fuerzas necesarias en las uniones, para lograr una posición y orientación específicamente deseada. Tales leyes describen el comportamiento dinámico de todo el sistema mecánico, siendo útiles también para simular al manipulador mediante computadora. Por medio de las simulaciones se puede comparar el desempeño del manipulador para diferentes arquitecturas de controladores.

Las leyes dinámicas gobernantes del manipulador son obtenidas mediante la mecánica clásica de Newton, o su equivalente en Lagrange. Estas últimas conducen a encontrar las ecuaciones matriciales dinámicas para todas las articulaciones del manipulador en términos de su morfología, y los parámetros gravitacionales e inerciales de todo el conjunto de enlaces acoplados.

I-4 PROGRAMACIÓN Y LENGUAJES DEL MANIPULADOR

El primer obstáculo al usar manipuladores de propósito general es el hecho de tener una comunicación confiable y eficiente entre el usuario y el sistema cibernético, de tal manera que el usuario pueda dirigir al manipulador para lograr eficientemente una tarea dada. Se tienen varias formas de comunicación con el manipulador, y los tres enfoques más empleados son: reconocimiento de palabras y comandos hablados, enseñar y reproducir lo enseñado, ya por último lenguajes de programación de alto nivel. El usar el método de reconocimiento de voz, no es muy confiable, es burdo y depende mucho del tono de voz de quien lo entrena. Un sistema de este tipo está limitado a reconocer un vocabulario poco extenso, y se necesitan pausas entre cada una de las palabras. Pero pese a tales restricciones, es posible reconocer palabras en tiempo real debido a la relativa gran velocidad de los componentes de las computadoras, y a los algoritmos de proceso eficientes. La utilidad de los comandos hablados es muy limitada para lograr adecuadamente una tarea de trabajo, además necesita grandes espacios de memoria para almacenar los datos de audio, y requiere un período de entrenamiento para hacer los escantillones característicos de cada comando.

Tomando el segundo método de enseñar y repetir lo enseñado, es conducir al manipulador a través de todos sus movimientos, y consta de tres pasos:

- i) Llevar al manipulador en movimiento lento a través de toda la tarea de ensamble, a las posiciones adecuadas y los ángulos de unión requeridos, finalmente los pasos de movimiento son grabados.
- ii) Editar y reproducir todos los pasos ya grabados en el paso anterior.
- iii) Si todo el movimiento es el correcto, entonces el manipulador se pone a funcionar a la velocidad apropiada para el movimiento repetitivo. Tal método es también conocido como guiado, y es la forma más común para entrenar a los manipuladores industriales de la actualidad.

Para resolver el problema de comunicación del automatista con el humano, se usan lenguajes de programación de alto nivel. Como ya se sabe sus áreas de trabajo más comunes son soldadura y pintado en aerosol, estas no requieren alguna interacción del medio ambiente con el manipulador, y por lo tanto, se pueden programar fácilmente para lograr sus objetivos. El manipulador para lograr su cometido se programa con lenguajes de alto nivel, de esta manera se garantiza que la tarea por realizarse se logrará satisfactoriamente, ya que el sistema está controlado por computadora, y esta es la forma más eficiente de comunicación del humano con un sistema digital. Al usarse programas para describir las tareas de ensamble, ayuda al manipulador a efectuar diferentes faenas ejecutando el programa adecuado. La flexibilidad y versatilidad del sistema es aumentada mediante una técnica de este tipo. Existen diferentes lenguajes de alto nivel para manipuladores, y cada uno tiene su aplicación específica para cada máquina y operación. Se tienen lenguajes a nivel de manipulador, y a nivel de tareas de trabajo.

1-5 PERCEPCIÓN DE LAS MÁQUINAS

Para algunas aplicaciones sencillas, las máquinas no necesitan información del medio que les rodea, pero a medida que la tarea a realizar se complica, es necesario enterar al manipulador de lo que sucede a su alrededor, para lo cual se necesita dotarlo de "sentidos", estos al compararse con los sentidos animales, resultan primitivos. Pero para ciertas aplicaciones, son lo suficientemente adecuados. Algunos sentidos pueden ser:

- i) Sentido de tacto y proximidad.
- ii) Reconocimiento de comandos hablados, y reproducción de voz.
- iii) Visión de máquinas.

Los sensores de tacto se refieren a aquellos dispositivos que detectan el contacto de ellos, con algún objeto sólido. Existen dos tipos, los sensores de contacto, y los sensores de fuerza, estos últimos llamados a veces sensores de esfuerzo. La diferencia básica es de que los sensores de tacto o contacto, entregan una señal que indica si algún obstáculo entró ya en contacto con el manipulador, dando como respuesta una salida afirmativa de la ocurrencia de ese contacto físico. También este sensor mediante un algoritmo adecuado puede detectar de una forma somera la forma del objeto tocado. Considerando los sensores de esfuerzo, estos indican la existencia de objetos, y además la fuerza de contacto que se les está aplicando.

Por otra parte al hablar de sensores de proximidad, se refiere a que estos detectan que tan cerca o lejos se encuentra del autómeta un obstáculo dado, este tipo de sensores se basan generalmente en el principio del radar, el cual se refiere a mandar un pulso electromagnético y esperar un intervalo de tiempo para saber si encontró un obstáculo en su camino, detectándose tal objeto por medio de la onda que rebota, entonces la distancia es calculada en base al tiempo que tarda en regresar la onda rebotada, al punto de emisión de tal pulso. Es posible mediante esta técnica conocer la morfología de los obstáculos, ya que para ciertas aplicaciones es necesario conocer sus dimensiones para localizar un punto específico o evitar el contacto.

En cuanto a reconocer los comandos hablados, se refiere a la posibilidad de darle a la máquina instrucciones con palabras, esto es logrado mediante un entrenamiento del autómeta, al cual se le enseña a reconocer la voz humana por medio de escantillones, dictándosele los comandos con palabras audibles, y se obtiene un diferente escantillón para cada instrucción.

Quando se habla de reproducción de voz, se quiere que el autómeta responda mediante la palabra hablada. Existen dos métodos de grabar la voz en forma digital: una es muestreando el audio y obtener su equivalente digital para cada muestra. La otra técnica es mediante fonemas, esta se basa en tener un C.I. grabado con sonidos básicos, posteriormente se forman frases y palabras mediante la secuenciación necesaria de estos sonidos. Esta técnica es usada ampliamente en los automóviles que hablan cuando se ovidan las llaves.

La visión en autómetas es un área de investigación amplia por el hecho de que los sistemas de visión artificial mas evolucionados, son realmente primitivos al compararse con la visión animal. El problema más grande a enfrentarse, es la cantidad de datos digitales necesarios para obtener una imagen aceptable.

INTRODUCCION

Esto implica grandes bancos de memoria debido a la gran velocidad de la luz, ya que es necesario digitalizar las imágenes lo más rápido posible mediante la interface A/D. Por supuesto que la conversión lleva tiempo, y se pierden detalles al convertir el cuadro de naturaleza analógica, a su equivalente digital. Para salvar estas restricciones se han propuesto diferentes técnicas y algoritmos de procesamiento de imágenes. La selección de las estrategias o combinaciones de estas, depende mucho de los detalles que se desean resaltar en los escantillones obtenidos de la imagen original.

I-6 INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Realmente el area de la IA es muy amplia, ya que dentro de esta se incluyen los sistemas de visión. En este trabajo se considera a la inteligencia artificial, a todo aquel sistema que pretenda simular la forma de razonamiento humano. En un sentido estricto nos limitaremos al estudio de los sistemas expertos. Todo sistema experto se basa en el uso de una lógica, la cual puede ser proposicional, y esta conduce a la predicción de los sucesos. La lógica empleada, se le puede llamar lógica proposicional de causa-efecto, ya que no solo está basada en la proposición de un fenómeno sino que analiza también el efecto producido por tal proposición. El otro aspecto, y el más importante, es de que los sistemas expertos se basan en la Ingeniería del conocimiento, la cual parte de la premisa básica de que todo sistema experto que pretenda simular inteligencia artificial, debe estar programado por un experto en dar solución al problema que se desea resolver mediante una técnica de este tipo.

Otro factor fundamental es de que debe existir un ser humano que conozca la solución al sistema experto. Un sistema de tal naturaleza es muy confiable si este es programado eficientemente en su lógica, y además se le planteen todos los problemas que enfrentará con todas sus soluciones, ya que existen campos del conocimiento humano donde el diagnóstico se da en base a preguntas y respuestas, y de esta manera es posible aislar el problema y solucionarlo.

I-7 FUTURO DE LAS MÁQUINAS "LISTAS"

Realmente cuando se habla del futuro de los autómatas, se quiere decir las características que se requerirán en los próximos años, y estas podrían ser:

- i) Inteligencia, los autómatas del futuro deberán ser inteligentes, capaces de tomar decisiones acerca de las tareas que estan efectuando, en base a instrucciones de alto nivel, y mediante realimentación de datos desde su ambiente de trabajo.
- ii) Capacidades sensoriales, los próximos autómatas deberán tener una gran cantidad de sensores, incluyendo vision en tercera dimensión, tacto, hablar y reconocer escantillones tanto de audio como de imagenes. Debe notarse que dentro de las capacidades sensoriales, será necesario el sentido del tacto a traves de toda una superficie, y no como se tiene actualmente de un solo punto. Estas capacidades serán necesarias para obtener información del ambiente de trabajo, y poder tomar decisiones.
- iii) Presencia a distancia, esto se refiere a la habilidad de comunicarse el autómata con el ser humano para informarle acerca de lo que ocurre a su alrededor, ya que el ambiente puede ser peligroso para el hombre. Este tipo de autómata ha sido empleado en la exploración espacial, tal es el caso de los envases al planeta Marte.

INTRODUCCION

- iv) Mejor diseño mecánico, el diseño mecánico deberá ser más eficiente, confiable, con sistemas de poder, y actuadores mejorados. Muchos de los diseños de autómatas deberán tener múltiples brazos, y por lo tanto mejores sistemas de control para coordinarlos al trabajar juntos. Se espera también diseño en forma modular para armar autómatas a las necesidades de cada sistema.
- v) Movilidad y dirección, los autómatas del futuro deberán desplazarse bajo sus propios sistemas de potencia y dirección.
- vi) Pinza universal, el diseño de la pinza del autómata deberá ser altamente sofisticado, y manos universales capaces de múltiples tareas, tendrán que estar disponibles.
- vii) Integración de sistemas en forma de redes, los autómatas futuros deberán ser muy amigables con el usuario, serán capaces de conectarse con otras redes y sistemas cibernéticos, para lograr un alto nivel de integración, usando sistemas modulares.

Aunque actualmente se habla de sistemas inteligentes, la verdad es que no son tan inteligentes como se pudiera creer, realmente pueden considerarse máquinas listas, y lo son tanto como lo quiera o pueda el programador. Lo que sí es cierto, es que ningún procesador puede ser más inteligente que su diseñador.

Para el futuro las máquinas deberán perfeccionarse en la forma de obtener la información del medio ambiente y tomar decisiones. Lo más importante es como procesar tanta información en poco tiempo, sin necesidad de rastrear todos los datos almacenados en su banco de memoria.

1-1 ORIENTACIÓN Y POSICIÓN DEL MANIPULADOR

De la mecánica es bien conocido que cualquier objeto que gira y se desplaza, puede ubicarse mediante de un sistema cartesiano fijo al cuerpo en movimiento, y un vector p , de posición. El giro y desplazamiento del referido objeto puede representarse por una matriz.

La orientación mediante los ángulos Eulerianos, representa el giro de algún sistema cartesiano alrededor de ejes. Este enfoque es la representación matricial de una serie de rotaciones que simplifica y reduce los cálculos, en el caso de querer conocer la relación existente entre un sistema que efectuó diversas rotaciones con respecto a un sistema que se encuentra fijo. Tal enfoque es excelente para algunos problemas mecánicos, pero desafortunadamente no tiene mucha aplicación para definir el comportamiento geométrico de cualquier manipulador, la razón es de que la matriz Euleriana no relaciona el sistema desplazado con la referencia fija, usando la geometría propia del manipulador. En la figura 1.1-1 se muestra un sistema que realizó las siguientes rotaciones:

- i) Un giro ϕ , alrededor del eje OZ, denotado por G_z, ϕ .
- ii) Un giro θ , alrededor del eje rotado OA, denotado por G_u, θ .
- iii) Un giro Γ , alrededor del eje rotado OB, denotado por G_v, Γ .

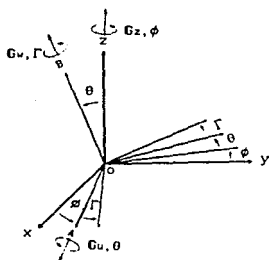


Figura 1.1-1 Rotación de un sistema mediante los ángulos de Euler.

Haciendo el producto y conservando el orden de las rotaciones debido a la no conmutatividad matricial, se obtiene: $G_{\phi, \theta, \Gamma} = G_z, \phi G_u, \theta G_v, \Gamma$.

$$G_{\phi, \theta, \Gamma} = \begin{bmatrix} C\phi & -S\phi & 0 \\ S\phi & C\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\theta & -S\theta \\ 0 & S\theta & C\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C\Gamma & -S\Gamma & 0 \\ S\Gamma & C\Gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1-1.1)$$

GEOMETRIA DEL MOVIMIENTO

Efectuando los productos anteriores se llega a una matriz de 3X3, la cual indica la orientación de algún enlace, pero no dice nada acerca de su posición con respecto al marco de referencia. Fácilmente este problema se resuelve con solo añadir un vector de posición p, lo cual conduce a una matriz de 4X4. Una desventaja de usar la orientación con los ángulos de Euler es la de no tener la relación geométrica de todos los enlaces. Debe destacarse que para efectos de cálculos matemáticos, un método Euleriano es adecuado por la razón de que un manipulador sin importar las combinaciones de enlace-unión que posea, su matriz se reduce a solo conocer un vector de seis elementos: X, Y, Z, ϕ , θ , Γ . Al efectuar el producto (1-1.1), e incluyendo un vector p, se llega a la siguiente relación denotada por: M_i .

$$M_i = \begin{bmatrix} C\phi C\Gamma - S\phi C\theta S\Gamma & -C\phi S\Gamma - S\phi C\theta C\Gamma & S\phi S\theta & p_x \\ S\phi C\Gamma + C\phi C\theta S\Gamma & -S\phi S\Gamma + C\phi C\theta C\Gamma & -C\phi S\theta & p_y \\ S\theta S\Gamma & S\theta C\Gamma & C\theta & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1-1.2)$$

La matriz (1-1.2) relaciona al marco de referencia con el i-ésimo enlace, donde p indica su posición, y los ángulos su orientación. Lo más común es que cuando i=n.g.d.i. la matriz relaciona una base dextrógrafa fija, con el enlace del porta-herramientas, aunque no hay impedimento en que la matriz relacione cualquier base cartesiana fija, con cualquier otro de los enlaces, aún este no pertenezca al porta-herramientas.

Dentro de las matrices Eulerianas de rotación, se tiene un caso especial para representar al porta-herramientas, conocido como la representación de Giro, Levante, y Derrape, denotada de la siguiente manera: G.L.D. La figura 1.1-2 muestra su interpretación geométrica.

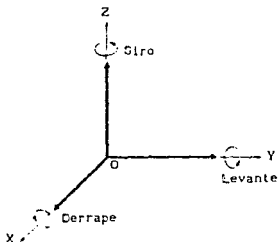


Figura 1.1-2 Interpretación geométrica de la matriz G.L.D.

Por su geometría se nota claramente que los giros efectuados son alrededor de los tres ejes coordenados. Tal sistema es empleado en la aeronáutica.

GEOMETRIA DEL MOVIMIENTO

La secuencia de rotaciones, es la siguiente:

- i) Un giro δ , alrededor del eje OZ, denotado por G_z, δ . Llamado Giro.
- ii) Un giro β , alrededor del eje OY, denotado por L_y, β . Llamado Levante.
- iii) Un giro α , alrededor del eje OX, denotado por D_x, α . Llamado Derrape.

Por lo que finalmente se llega a la matriz Euleriana de 4×4 , que incluye un vector de posición.

$$GLD = \begin{bmatrix} C\delta C\beta & C\delta S\beta S\alpha - S\delta C\alpha & C\delta S\beta C\alpha + S\delta S\alpha & p_x \\ S\delta C\beta & S\delta S\beta S\alpha + C\delta C\alpha & S\delta S\beta C\alpha - C\delta S\alpha & p_y \\ -S\beta & C\beta S\alpha & C\beta C\alpha & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1-1.3)$$

La geometría del movimiento analiza al manipulador sin considerar las fuerzas causantes del desplazamiento. A partir de aquí se modela matemáticamente para conocer el comportamiento total dentro del espacio de trabajo, en función del tiempo, la relación entre los parámetros de los enlaces, y las variables de unión. El modelado geométrico proporciona la posición y orientación dada para cualquier enlace del manipulador, pero especialmente la ubicación del porta-herramientas, en base a la morfología de la cadena cinemática. Para el modelado de un manipulador es necesario relacionar su geometría espacial con todos sus enlaces. El manipulador mecánico puede modelarse como una cadena articulada en lazo abierto de cuerpos rígidos llamados enlaces, conectados en serie con uniones prismáticas o de revoluta, movidas por impulsores. Tiene un extremo sujeto firmemente a una base, y el extremo libre se encarga de llegar al punto requerido dentro de su espacio de trabajo, en este extremo se instala la pinza, herramienta, o el dispositivo necesario para lograr la tarea requerida. A esta parte del manipulador no se le puede decir mano y, en el presente trabajo se llamará porta-herramientas. La rotación y traslación de los enlaces causa el movimiento de los enlaces, y a estos a su vez, ubican el porta-herramientas en la posición y orientación deseada. La descripción de todo el movimiento se logra utilizando ecuaciones matriciales en base a la geometría del manipulador, usándose dos enfoques para analizar su comportamiento dentro del espacio de trabajo.

El primer enfoque es la geometría de la posición-orientación, que se refiere a que si son conocidos los parámetros geométricos, y el vector de ángulos en las uniones, denotado por: $\lambda(t) = \{a_1(t), a_2(t), \dots, a_n(t)\}$, se desea conocer la relación existente entre la posición y orientación del porta-herramientas, con respecto a un sistema de coordenadas dextrógrafas, aunque es posible modelar la cadena mediante coordenadas esféricas o cilíndricas.

El segundo enfoque llamado solución de la posición-orientación, es la parte complementaria al anterior. Conociendo la morfología del manipulador ¿Puede ubicarse la herramienta en un punto específico con una orientación deseada?

Generalmente las variables independientes de un manipulador son las de unión, y las tareas de trabajo son establecidas con respecto a una referencia fija, es obvio que para ubicar el porta-herramientas, se usa la solución de la posición-orientación. Debe notarse que este problema puede tener solución, varias soluciones, o puede no tener.

En 1955 Denavit y Hartenberg, propusieron un método sistemático y general de álgebra matricial para relacionar la geometría espacial de los enlaces con el marco de referencia. Este método usa matrices homogéneas de transformación de 4X4 para describir la relación espacial de dos enlaces adyacentes. Esto reduce el problema a encontrar una matriz de transformación equivalente, que relaciona el desplazamiento de la herramienta con el sistema de referencia. A partir de estas matrices de transformación se puede hacer el modelo dinámico.

1-2 GEOMETRÍA DE LA POSICIÓN-ORIENTACIÓN

Álgebra vectorial y matricial son empleadas para representar y describir la ubicación de los enlaces mecánicos en el espacio con respecto a una referencia que se encuentra fija. El método de Denavit-Hartenberg, utiliza matrices de rotación, y una matriz de rotación se define como una matriz de transformación la cual opera en un vector de posición p , dentro de un espacio tridimensional euclidiano, y relaciona sus coordenadas $oabc$ con un marco de referencia de coordenadas dextrógiras, $oxyz$. Este punto p en el espacio puede representarse por dos maneras, una es su ubicación con respecto $oxyz$, $\rightarrow p_{xyz} = (p_x, p_y, p_z)^T$ y la otra manera es con respecto al sistema $oabc$, $\rightarrow p_{abc} = (p_a, p_b, p_c)^T$ donde resulta claro que p_{xyz} y p_{abc} representan al mismo punto p en el espacio desde diferentes sistemas de coordenadas rectangulares. Ahora se quiere encontrar la matriz R de 3X3, que transforma las coordenadas del punto p_{abc} , a las coordenadas expresadas con respecto al sistema $oxyz$, una vez que el sistema $oabc$ ha sido girado esto es:

$$p_{xyz} = R p_{abc} \quad (1-2.1)$$

Tal como lo muestra la figura siguiente.

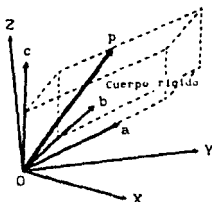


Figura 1.2-1 sistema de referencia $oxyz$ y el sistema girado $oabc$.

El vector p se expresa en términos de sus vectores unitarios como:

$$p_{abc} = p_{a1}a_1 + p_{b1}b_1 + p_{c1}c_1 \quad (1-2.2)$$

Ahora el análisis geométrico del vector p , referenciado al sistema $oxyz$, se logra mediante las proyecciones de p a lo largo de los ejes ox , oy , oz . Al usar vectores unitarios y la relación (1-2.2), se llega a:

$$\begin{aligned} p_x &= i_x p = i_x p_{a1} + i_x p_{b1} + i_x p_{c1} \\ p_y &= j_y p = j_y p_{a1} + j_y p_{b1} + j_y p_{c1} \\ p_z &= k_z p = k_z p_{a1} + k_z p_{b1} + k_z p_{c1} \end{aligned} \quad (1-2.3)$$

Expresado matricialmente por:

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_x a_1 & i_x b_1 & i_x c_1 \\ j_y a_1 & j_y b_1 & j_y c_1 \\ k_z a_1 & k_z b_1 & k_z c_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_a \\ p_b \\ p_c \end{bmatrix} \quad (1-2.4)$$

Usando la matriz (1-2.4) se tiene que R , de (1-2.1) está dada por:

$$R = \begin{bmatrix} i_x a_1 & i_x b_1 & i_x c_1 \\ j_y a_1 & j_y b_1 & j_y c_1 \\ k_z a_1 & k_z b_1 & k_z c_1 \end{bmatrix} \quad (1-2.5)$$

Análogamente se encuentran las coordenadas p_{abc} a partir del punto p_{xyz} :

$$p_{abc} = Q p_{xyz} \quad (1-2.6)$$

En forma matricial se tiene:

$$\begin{bmatrix} p_a \\ p_b \\ p_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a i_x & i_a j_y & i_a k_z \\ j_b i_x & j_b j_y & j_b k_z \\ k_c i_x & k_c j_y & k_c k_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} \quad (1-2.7)$$

Como el producto interno es conmutativo, se tiene entonces,

$$Q = R^{-1} = R^T \quad (1-2.8)$$

$$\text{y además} \quad QR = R^T R = R^{-1} R = I_3 \quad (1-2.9)$$

La transformación dada por (1-2.1) y (1-2.6), se conoce como transformación ortogonal, y como los productos internos son hechos con vectores unitarios, además es ortonormal.

GEOMETRIA DEL MOVIMIENTO

El producto interno definido por: $a \cdot b = ab(\cos \alpha)$, se usa para obtener tres matrices de rotación, que solo dependen del ángulo entre los dos vectores.

esto es: $\rho_{xyz} = R_{x,\alpha} \rho_{abc}$ (1-2.10)

Haciendo $i_x = i_a$ se llega a la matriz $R_{x,\alpha}$, que es la matriz de rotación alrededor de x , un ángulo α . Expresada por:

$$R_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} i_x i_a & i_x j_b & i_x k_c \\ j_y i_a & j_y j_b & j_y k_c \\ k_z i_a & k_z j_b & k_z k_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (1-2.11)$$

De forma análoga se encuentran las matrices de rotación alrededor de los ejes y , z , los ángulos ϕ , y ψ respectivamente.

$$R_{y,\phi} = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix} \quad R_{z,\psi} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Las matrices anteriores se conocen como matrices básicas de rotación. En la siguiente figura se muestra su significado geométrico.

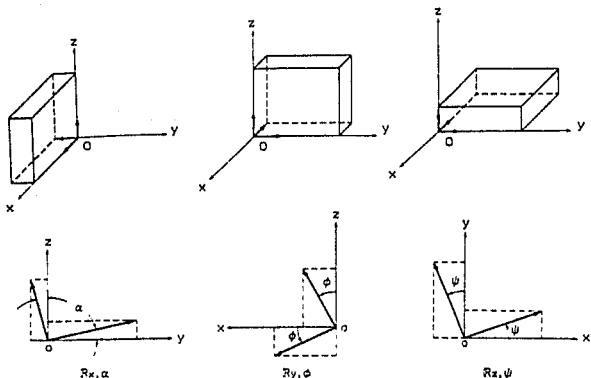


Figura 1.2-2 Interpretación geométrica de las matrices de rotación.

GEOMETRIA DEL MOVIMIENTO

Es trivial que un sistema rectangular no solo puede rotar alrededor de uno de los ejes x, y, z, también puede hacer una serieación de giros, los cuales en su forma más general son alrededor de los tres ejes cartesianos, es decir, se tendría una serie de rotaciones una seguida de otra, esto resultaría una composición de rotaciones, que por supuesto tiene su representación matricial, denominada matriz de rotación compuesta. Se obtiene una matriz de rotación compuesta al girar el sistema un ángulo α , alrededor del eje x; otro ángulo ψ , alrededor del eje z; por último un ángulo ϕ alrededor del eje y. Es de suma importancia conservar todas las premultiplicaciones, multiplicaciones y postmultiplicaciones en su orden original.

$$R = R_{x,\alpha} R_{z,\psi} R_{y,\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C\psi & -S\psi & 0 \\ S\psi & C\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C\phi & 0 & S\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -S\phi & 0 & C\phi \end{bmatrix}$$

Por lo que la matriz compuesta final es:

$$R = \begin{bmatrix} C\psi C\phi & -S\psi & C\psi S\phi \\ \cos \alpha S\psi C\phi + S\alpha S\phi & \cos \alpha C\psi & \cos \alpha S\psi S\phi - S\alpha C\phi \\ S\alpha S\psi C\phi - \cos \alpha S\phi & S\alpha C\psi & S\alpha S\psi S\phi + \cos \alpha C\phi \end{bmatrix} \quad (1-2.12)$$

Es posible rotar un sistema sobre sus ejes a, b, c, un ángulo arbitrario. Es obvio que puede girarse el sistema oabc, alrededor de un eje que no pertenezca al sistema oxyz, ni al mismo sistema oabc.

La representación matricial es un buen método de representar el giro de un sistema rectangular alrededor de cualquier eje y necesita matrices de 3X3; es decir, nueve elementos para describir cada uno de los giros del sistema. Es posible dar a las rotaciones un enfoque geométrico, y describirlas en función de los ángulos de rotación conocidos como ángulos de Euler. De lo anterior se llega al método de Denavit-Hartenberg para relacionar el marco de referencia fijo del manipulador, con la posición del porta-herramientas, basándose en su geometría y variables de unión dentro de su volumen de trabajo. La matriz de rotación compuesta relaciona la serie de giros del sistema oabc con el sistema fijo oxyz, pero no dice nada acerca de su movimiento de translación referente al marco fijo oxyz. Añadiendo un cuarto vector de posición: $p = (p_x, p_y, p_z)$, se llega a una matriz aumentada de 4X4, que puede considerarse una matriz formada por cuatro submatrices representando físicamente lo siguiente:

- 1) Una matriz de rotación R, de 3X3.
- ii) La matriz p_{x1} , perteneciente al vector de posición p.
- iii) Otra matriz fix_3 , que es una transformación en perspectiva.
- iv) Factor de escalamiento de 1X1, para cibernética se emplea la unidad.

Finalmente se llega a la matriz de transformación homogénea, denotada por T .

$$T = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & P_{3 \times 1} \\ f_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (1-2.13)$$

La matriz (1-2.13) relaciona al sistema de referencia $oxyz$, con el sistema $oabc$ rotado los ángulos α , ϕ , ψ , y desplazado una posición p . Haciendo un análisis de la matriz T , se observa que la submatriz $p_{3 \times 1}$, es el vector de posición que tiene la propiedad de trasladar al sistema $oabc$ con respecto al sistema original $oxyz$, las unidades p_x , p_y , p_z , denominada matriz de translación homogénea básica, y denotada por T_{trans} . Prosiguiendo con el análisis de la matriz de transformación homogénea, $f_{1 \times 3}$ es la submatriz de transformación en perspectiva, usada en la calibración de las cámaras para visión por computadora. Para el análisis cinemático, esta es ajustada a cero para indicar una transformación en perspectiva nula. Ahora considerando la matriz IXI , produce un escalamiento global de las coordenadas p_x , p_y , p_z .

Considerando la definición de manipulador, se define ahora lo que es un grado de libertad: cada pareja de enlace-unión constituyen un grado de libertad. El n.g.d.l que proporciona un buen volumen de trabajo es el de 6, ya que un manipulador con más de 6 grados, complica excesivamente su análisis y control.

Es importante destacar que el enlace 0, fijo al marco de referencia no se considera parte del manipulador, y el n -ésimo o último enlace, es aquél que lleva al porta-herramientas. También está claro que cada enlace es conectado a lo más a otros dos enlaces para cumplir la definición de que un manipulador es una cadena en lazo abierto de enlaces, conectados por uniones. Denavit y Hartenberg desarrollaron un método sistemático para relacionar las coordenadas del porta-herramientas con las del marco de referencia, ubicando un sistema ortonormal (x_i, y_i, z_i) para cada enlace-unión. Se tienen n sistemas, uno para cada grado de libertad, donde n es el número de grados de libertad, y además $i = 1, 2, \dots, n$, más un sistema ortonormal (x_0, y_0, z_0) fijo, no perteneciente al manipulador. Para un manipulador con 6 g.d.l, se tienen siete sistemas dextrógiros, uno para cada grado de libertad, más un séptimo fijo a la base del manipulador: $(x_0, y_0, z_0); (x_1, y_1, z_1); \dots; (x_6, y_6, z_6)$.

Donde cada sistema se establece en base a las reglas siguientes:

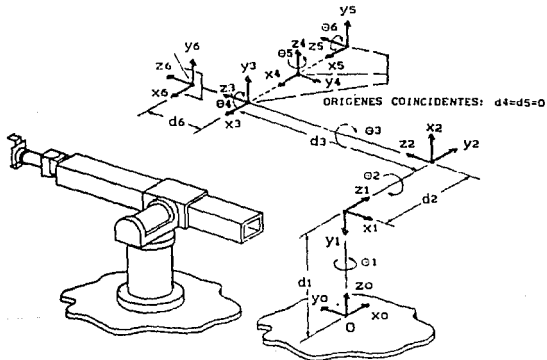
- i) El eje Z_{i-1} corre a lo largo del eje de movimiento de la i -áva unión.
- ii) El eje X_i es normal al eje Z_{i-1} , y su sentido es alejándose de Z_{i-1} .
- iii) El eje Y_i completa el sistema dextrógiro de coordenadas rectangulares.

En base a estas reglas, uno es libre de seleccionar la ubicación del sistema fijo (x_0, y_0, z_0) , solo se deben cumplir con las siguientes restricciones, el eje Z_0 corre a lo largo del eje de movimiento de la primera unión, y el sistema dextrógiro del porta-herramientas, denotado por: (x_n, y_n, z_n) debe orientarse tal que el eje X_n , sea normal al eje Z_{n-1} . La representación D-H para el manipulador, depende de cuatro relaciones geométricas asociados a cada grado de libertad. Relaciones que definen totalmente a cualquier tipo de mezclas enlace-unión, ya sean estas de revoluta, o prismáticas.

Los parámetros de la convención Denavit-Hartenberg son los siguientes:

- θ_i Es el ángulo de cuadratura entre el eje X_{i-1} , al eje X_i , alrededor del eje Z_{i-1} usando un sistema dextrógiro.
- d_i Es la distancia del origen del $(i-1)$ avo marco de referencia, a la intersección del eje Z_{i-1} , con el eje X_i a lo largo del eje Z_{i-1} .
- a_i Es el desnivel entre la intersección del eje Z_{i-1} , con el eje X_i , al origen del i -avo marco a lo largo del eje X_i . O la distancia más corta entre los ejes Z_{i-1} a Z_i .
- α_i Es el ángulo de cuadratura del eje Z_{i-1} al eje Z_i , alrededor del eje X_i , usando un sistema dextrógiro.

Aplicando las reglas anteriores a dos manipuladores comunes actualmente:

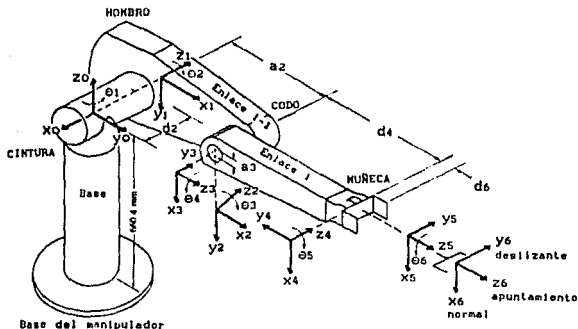


Parámetros de los enlaces para un manipulador 2R-P-3R

Unión i	θ_i	α_i	a_i	d_i
1	$\theta_1 = -90$	-90	00	d_1
2	$\theta_2 = -90$	$+90$	00	d_2
3	$\theta_3 = -90$	00	00	d_3
4	$\theta_4 = 00$	-90	00	00
5	$\theta_5 = 00$	$+90$	00	00
6	$\theta_6 = 00$	00	00	d_6

Figura 1.2-3 Parámetros de un manipulador 2R-P-3R.

Nótese que los dos manipuladores son de diferente morfología, y además que son clasificados en base al tipo de articulaciones que poseen.



Parámetros de los enlaces para un manipulador 6R				
Unión i	θ_i	α_i	a_i	d_i
1	$\theta_1 = +90$	-90	00	00
2	$\theta_2 = 00$	00	a_2	d_2
3	$\theta_3 = +90$	+90	a_3	00
4	$\theta_4 = 00$	-90	00	d_4
5	$\theta_5 = 00$	+90	00	00
6	$\theta_6 = 00$	00	00	d_6

Figura 1.2-4 Parámetros para un manipulador 6R.

De los anteriores sistemas, se observa que para una junta articulada los parámetros de unión d_i , a_i permanecen constantes, y además θ_i es una variable de unión que cambia cuando el enlace i, rota o se mueve con respecto al enlace i-1. Considerando una unión prismática se nota que los parámetros θ_i , a_i son constantes, y que la variable de unión es d_i . Se concluye que:

- i) La variable de unión para una junta articulada es θ_i .
- ii) Los parámetros de unión para una junta articulada son d_i , a_i , e α_i .
- iii) La variable de unión para una junta prismática es d_i .
- iv) Los parámetros de unión para una junta prismática son θ_i , a_i , e α_i .

De las conclusiones anteriores y de los ejemplos para ambos manipuladores, se establece el método D-M para ubicar un sistema dextrógiro en cada enlace y dar la interpretación geométrica de los parámetros y variables de unión, mediante las siguientes doce reglas:

Algoritmo D-H para ubicar los sistemas coordinados de los enlaces:

- D-H₁ Ubicar el sistema de referencia (x_0, y_0, z_0) , estableciendo un sistema rectangular dextrógiro en la base del manipulador con el eje Z_0 , a lo largo del eje de movimiento de la unión 1, y apuntando a la parte superior del hombro del manipulador. Colocar los ejes X_0 e Y_0 , apuntando, y en la posición correcta para un sistema dextrógiro.
- D-H₂ Realizar los pasos D-H₃ → D-H₆ para cada enlace i , donde $i=1, \dots, n-1$.
- D-H₃ Establecer los ejes de unión, alinear el eje Z_i , con el eje de movimiento de la unión $i+1$. Para manipuladores de configuración con brazo izquierdo, los ejes Z_i y Z_{i+1} , deben tener el sentido saliendo del cuerpo del manipulador en cuestión.
- D-H₄ Establecer el origen del i -avo sistema coordinado, localizar el origen del i -avo sistema en la intersección de los ejes Z_i y Z_{i+1} .
- D-H₅ Establecer el eje X_i , $X_i = \pm(Z_{i+1} \times Z_i) / \|Z_{i+1} \times Z_i\|$, o a lo largo de la normal común entre los ejes Z_{i+1} y Z_i , cuando estos son paralelos.
- D-H₆ Establecer el eje Y_i , $Y_i = +(Z_i \times X_i) / \|Z_i \times X_i\|$, para completar un sistema dextrógiro. Posiblemente sea necesario extender los ejes Z_i y el X_i , para poder hallar los parámetros y variables de unión de los pasos D-H₉ → D-H₁₂.
- D-H₇ Establecer el sistema de coordenadas del porta-herramientas, como generalmente la última unión del manipulador es de revoluta, se debe colocar el eje Z_n a lo largo de la dirección del eje Z_{n-1} , y con un sentido alejándose del manipulador. Ubicar X_n para que quede normal a los ejes Z_{n-1} y Z_n . Ya por último colocar Y_n para tener un sistema dextrógiro.
- D-H₈ Hallar los parámetros de enlace y unión para cada i , donde $i=1, 2, \dots, n$ y efectuar los pasos D-H₉ → D-H₁₂.
- D-H₉ Hallar d_i , y esta es la distancia del origen del $(i-1)$ avo sistema rectangular, a la intersección del eje Z_{i-1} con X_i , a lo largo del eje Z_{i-1} . Si la unión es de tipo prismático, por supuesto que d_i es la variable de unión.
- D-H₁₀ Hallar a_i que es el desnivel desde la intersección del eje Z_{i-1} con el eje X_i al origen del i -avo sistema rectangular a lo largo del eje X_i .
- D-H₁₁ Hallar α_i , donde este es el ángulo de cuadratura desde el eje X_{i-1} hacia el eje X_i , alrededor del eje Z_{i-1} . Cuando la unión es de revoluta, α_i es la variable de unión.
- D-H₁₂ Hallar σ_i , que es el ángulo de cuadratura del eje Z_{i-1} hacia el eje Z_i alrededor del eje X_i .

Mediante el algoritmo anterior, se establecen sistemas dextrógiros para cada uno de los enlaces. Con la representación D-H se encuentra una matriz de transformación homogénea que relaciona al i -avo sistema, con el $(i+1)$ avo.

Observando la figura 1.2-5, es trivial que el i -avo sistema rectangular puede expresarse dentro del $(i+1)$ avo sistema, por medio de las transformaciones siguientes:

- i) Transladarse a lo largo del eje Z_{i-1} una distancia d_i , para que los orígenes de ambos sistemas queden en el mismo plano.
- ii) Al girar alrededor del eje Z_{i-1} , un ángulo α_i se alinea el eje X_{i-1} con el eje X_i , quedando paralelos ambos ejes.
- iii) Transladarse a lo largo del eje X_i una distancia a_i , para que los dos orígenes coincidan.

- iv) Finalmente girar alrededor del eje X_1 , un ángulo α_1 , con lo cual el sistema i coincide con el sistema $(i+1)$.

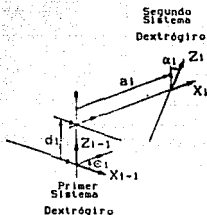


Figura 1.2-5 Sistemas de coordenadas de los enlaces, y sus parámetros.

Las cuatro operaciones matriciales anteriores, se expresan por medio de la matriz conocida como matriz D-H de transformación para marcos de coordenadas adyacentes. Esta matriz relaciona al sistema $(i-1)$, con el sistema i , denotada por ${}^{i-1}DH_i$. Para una unión de revoluta se tiene que:

Haciendo el producto $\bullet {}^{i-1}DH_i = T_{z,d} T_{x,\alpha} T_{x,\alpha}$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\alpha_1 & -\text{sen}\alpha_1 & 0 & 0 \\ \text{sen}\alpha_1 & \cos\alpha_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_1 & -\text{sen}\alpha_1 & 0 \\ 0 & \text{sen}\alpha_1 & \cos\alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{i-1}DH_i = \begin{bmatrix} \cos\alpha_1 & -\cos\alpha_1 \text{sen}\alpha_1 & \text{sen}\alpha_1 \text{sen}\alpha_1 & a_i \cos\alpha_1 \\ \text{sen}\alpha_1 & \cos\alpha_1 \cos\alpha_1 & -\text{sen}\alpha_1 \cos\alpha_1 & a_i \text{sen}\alpha_1 \\ 0 & \text{sen}\alpha_1 & \cos\alpha_1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1-2.14)$$

El significado geométrico de ${}^{i-1}DH_i$, es de que partiendo del marco $(i-1)$, se desea conocer la serieación de giros y translaciones necesarios para que este marco logre la posición y orientación del i -ésimo sistema, en base a la morfología de la articulación, nótese que existe una matriz que relaciona cada pareja de sistemas enlace-unión. Por supuesto que si ${}^{i-1}DH_i$ es no singular su inversa existe, y el significado geométrico es de es de que partiendo del marco i , se desea lograr la posición y orientación del marco $(i-1)$.

Denotada por:

$$\left[{}^{i-1}DH_i \right]^{-1} = {}^iDH_{i-1} \quad (1-2.15)$$

GEOMETRIA DEL MOVIMIENTO

Existen diferentes algoritmos para poder calcular ${}^iD_{H_{i-1}}$, los cuales serán tratados en la parte de la solución de la posición-orientación. Para un análisis de sistemas invariantes en el tiempo la matriz ${}^{i-1}D_{H_i}$ está formada por elementos constantes, cuando el manipulador está fijo.

De (1-2.14), y (1-2.15) se llega a (1-2.16).

$${}^iD_{H_{i-1}} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & \sin\theta_i & 0 & -a_i \\ -\cos\theta_i \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\theta_i & \sin\theta_i & -d_i \sin\theta_i \\ \sin\theta_i \sin\theta_i & -\sin\theta_i \cos\theta_i & \cos\theta_i & -d_i \cos\theta_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1-2.16)$$

Se tiene que (1-2.14), y (1-2.16), relacionan los tres parámetros de una pareja enlace-unión, en conjunto con su variable θ_i , tanto para referenciar al sistema (i-1) con el i, así como al sistema i con respecto al sistema (i-1), para una unión de revoluta.

Por supuesto, que se obtiene la matriz para una unión prismática haciendo el producto $\ast {}^{i-1}D_{H_i} = Y_{z,d} Y_{z,\theta} Y_{x,\alpha}$. Debe notarse que este es solamente la multiplicación de tres matrices de rotación-translación.

$${}^{i-1}D_{H_i} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\cos\theta_i \sin\theta_i & \sin\theta_i \sin\theta_i & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\theta_i & 0 \\ 0 & \sin\theta_i & \cos\theta_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1-2.17)$$

Se tiene su inversa la cual es:

$${}^iD_{H_{i-1}} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & \sin\theta_i & 0 & 0 \\ -\cos\theta_i \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\theta_i & \sin\theta_i & -d_i \sin\theta_i \\ \cos\theta_i \sin\theta_i & -\sin\theta_i \cos\theta_i & \cos\theta_i & -d_i \cos\theta_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1-2.18)$$

Para una unión prismática los parámetros son a_i , d_i , y θ_i , y como variable de unión se tiene a d_i . Es posible teniendo un punto p_i fijo al enlace i, expresado por medio de su propio sistema de coordenadas, relacionarlo mediante ${}^{i-1}D_{H_i}$ con un punto perteneciente al enlace (i-1) mediante (1-2.19).

$$p_{i-1} = {}^{i-1}D_{H_i} p_i \quad (1-2.19)$$

Donde: $p_{i-1} = (X_{i-1}, Y_{i-1}, Z_{i-1}, 1)^T$; $p_i = (X_i, Y_i, Z_i, 1)^T$

GEOMETRIA DEL MOVIMIENTO

Haciendo el producto de las matrices de transformación D-H, se obtiene una matriz homogénea 0T_i que relaciona al sistema de (X_0, Y_0, Z_0) perteneciente a la base, con el último sistema (X_i, Y_i, Z_i) que por lo general está fijo al porta-herramientas, cuando $i = n.g.d.l.$

Se tiene que: ${}^0T_i = {}^0D_{H1} {}^1D_{H2} {}^2D_{H3} \dots {}^{i-1}D_{Hi} = \prod_{j=1}^i {}^jD_{Hj}$ con $i=1,2,3,\dots,n$

$${}^0T_i = \begin{bmatrix} X_i & Y_i & Z_i & p_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^0R_i & {}^0p_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1-2.20)$$

Donde:

$[X_i, Y_i, Z_i]$, Es la matriz de rotación de 3×3 , perteneciente al enlace i .

p_i , Es el vector de posición de 3×1 , que va del sistema fijo de referencia hacia el i -ésimo sistema.

Basándose en un manipulador 6R se obtendrá a partir de (1-2.20), la matriz de brazo: $T_b = {}^0T_6$, siendo la más usada en los manipuladores. Esta especifica la posición y orientación del punto final del manipulador, con respecto al sistema de la base. Para $i = 6$, se tiene de la forma:

$$T_b = \begin{bmatrix} {}^0R_6 & {}^0p_6 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & d & a & F \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & d_x & a_x & p_x \\ n_y & d_y & a_y & p_y \\ n_z & d_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1-2.21)$$

En la figura 1.2-6 se muestra:

- n Vector normal al porta-herramientas, si este es una pinza con quijadas paralelas, este vector será ortogonal a la tenazas.
- d Vector deslizante del porta-herramientas, tiene el sentido del movimiento de las quijadas cuando estas abren o cierran.
- a Vector normal de apuntamiento del porta-herramientas, vector normal a la placa que sostiene a la pinza, con el sentido alejándose de la misma.
- p Vector de posición del porta-herramientas, vector que parte del marco de la base, y llega al origen del marco del porta-herramientas, sistema ubicado en el centro de la pinza, con las tenazas cerradas.

GEOMETRÍA DEL MOVIMIENTO

La figura siguiente muestra las coordenadas de la pinza o porta-herramientas del manipulador, y la relación con el sistema dextrógiro de la base.

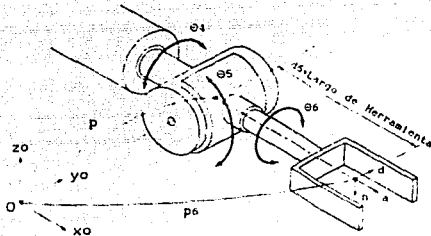


Figura 1.2-6 Relación del porta-herramientas con su base.

A partir de las 6 matrices de coordenadas adyacentes de rotación-traslación del brazo, se llega a dos matrices de transformación, T_1 , y T_2 . Considerando la siguiente notación:

$$C_i \equiv \cos \theta_i; \quad C_{ij} \equiv \cos(\theta_i + \theta_j) \quad S_i \equiv \sin \theta_i; \quad S_{ij} \equiv \sin(\theta_i + \theta_j)$$

Además $T_1 T_2 = {}^0T_6$, y el producto de T_1 con T_2 se mostrará haciendo cambios de variable para expresarlo como T_6 de la relación (1-2.25).

$${}^0DH_1 = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & -S_1 & 0 \\ S_1 & 0 & C_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^1DH_2 = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & a_2 C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & a_2 S_2 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^2DH_3 = \begin{bmatrix} C_3 & 0 & S_3 & a_3 C_3 \\ S_3 & 0 & -C_3 & a_3 S_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3DH_4 = \begin{bmatrix} C_4 & 0 & -S_4 & 0 \\ S_4 & 0 & C_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^4DH_5 = \begin{bmatrix} C_5 & 0 & S_5 & 0 \\ S_5 & 0 & -C_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^5DH_6 = \begin{bmatrix} C_6 & -S_6 & 0 & 0 \\ S_6 & C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

GEOMETRIA DEL MOVIMIENTO

Definiendo a $T_1 = {}^0T_3 = {}^0DH_1 {}^1DH_2 {}^2DH_3$; $T_2 = {}^3T_6 = {}^3DH_4 {}^4DH_5 {}^5DH_6$ →

$$T_1 = \begin{bmatrix} C_1C_{23} & -S_1 & C_1S_{23} & a_2C_1C_2 + a_3C_1C_{23} - d_2S_1 \\ S_1C_{23} & C_1 & S_1S_{23} & a_2S_1C_2 + a_3S_1C_{23} + d_2C_1 \\ -S_{23} & 0 & C_{23} & -a_2S_2 - a_3S_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1-2.22)$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} C_4C_5C_6 - S_4S_6 & -C_4C_5S_6 - S_4C_6 & C_4S_5 & d_6C_4S_5 \\ S_4C_5C_6 + C_4S_6 & -S_4C_5S_6 + C_4C_6 & S_4S_5 & d_6S_4S_5 \\ -S_5C_6 & S_5S_6 & C_5 & d_6C_5 + d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1-2.23)$$

Finalmente se llega a la ecuación de brazo:

$$T_{12} = \begin{bmatrix} n_x & d_x & a_x & p_x \\ n_y & d_y & a_y & p_y \\ n_z & d_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1-2.24)$$

Donde cada uno de los elementos es:

$$n_x = C_1[C_{23}(C_4C_5C_6 - S_4S_6) - S_{23}S_1C_6] - S_1(S_4C_5C_6 + C_4S_6)$$

$$n_y = S_1[C_{23}(C_4C_5C_6 - S_4S_6) - S_{23}S_1C_6] + C_1(S_4C_5C_6 + C_4S_6)$$

$$n_z = -S_{23}[C_4C_5C_6 - S_4S_6] - C_{23}S_5C_6$$

$$d_x = C_1[-C_{23}(C_4C_5S_6 + S_4C_6) + S_{23}S_1S_6] - S_1(-S_4C_5S_6 + C_4C_6)$$

$$d_y = S_1[-C_{23}(C_4C_5S_6 + S_4C_6) + S_{23}S_1S_6] + C_1(-S_4C_5S_6 + C_4C_6)$$

$$d_z = S_{23}(C_4C_5S_6 + S_4C_6) + C_{23}S_5S_6$$

$$a_x = C_1(C_{23}C_4S_5 + S_{23}C_5) - S_1S_4S_5$$

$$a_y = S_1(C_{23}C_4S_5 + S_{23}C_5) + C_1S_4S_5$$

$$a_z = -S_{23}C_4S_5 + C_{23}C_5$$

$$p_x = C_1[d_6(C_{23}C_4S_5 + S_{23}C_5) + S_{23}d_4 + a_3C_{23} + a_2C_2] - S_1(d_6S_4S_5 + d_2)$$

$$p_y = S_1[d_6(C_{23}C_4S_5 + S_{23}C_5) + S_{23}d_4 + a_3C_{23} + a_2C_2] + C_1(d_6S_4S_5 + d_2)$$

$$p_z = d_6(C_{23}C_5 - S_{23}C_4S_6) + C_{23}d_4 - a_3S_{23} - a_2S_2$$

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

De estas últimas ecuaciones es importante notar la gran cantidad de cálculos necesarios para ubicar al porta-herramientas. Esta es la razón principal de que el n.g.d.l. en los manipuladores se limite a 6. Ya que para controlar adecuadamente al manipulador, es necesario conocer su posición y orientación.

Tan solo en el caso anterior se necesita calcular 20 adiciones, 40 productos, y conocer 12 funciones trascendentales, para obtener la matriz T_b , si solo se calcula la submatriz superior derecha de 3×3 . Y el vector n se obtiene a partir del producto cruz $n = d \times a$.

De esto último considérese que aún actualmente para poder controlar un manipulador, existen algoritmos de control propuestos que no son realizables debido a la cantidad de cálculos que deben efectuarse. Algunos algoritmos no son posibles debido a que los μC , μP , bit-slice RAM, ROM, y otros dispositivos, no son lo suficientemente rápidos para controlar en tiempo real.

Por ejemplo un manipulador 6R utiliza una computadora de control, y además 6 μP 6503, uno para cada articulación, esto es sin contar codificadores, servos, convertidores A/D-D/A, memorias y todo lo demás propio de un sistema digital.

Por todo lo anterior se aprecia la complejidad del sistema de control para los manipuladores, debido a la gran cantidad de cálculos a realizar durante el periodo de muestreo. Actualmente es imposible efectuar todas las operaciones necesarias dentro del periodo de muestreo, para lograr el objetivo de control para algunos algoritmos propuestos. Aún para sistemas digitales basados en la familia 8086, y coprocesador, tales controladores no son realizables.

1-3 SOLUCIÓN DE LA POSICIÓN-ORIENTACIÓN

Conociendo la morfología del manipulador, el objetivo de control es en base a lograr una posición o una trayectoria deseada. Objetivo que no siempre se alcanza, ya que precisamente la geometría del brazo no permite lograr algunas posiciones y orientaciones, tales casos se les denomina singularidades del brazo. La solución de la posición y orientación es la parte fundamental en el control de un manipulador, ya que se parte de que conociendo la geometría espacial propia del mismo, se requiere alcanzar una trayectoria o un punto específico. Tal cometido se logra al proporcionar los ángulos correctos en cada una de las uniones, para que el porta-herramientas sea ubicado con la posición y orientación deseada. Esto es logrado al encontrar el vector de los ángulos de unión $\Delta t^i = [a_1(t), a_2(t), \dots, a_n(t)]^T$, conociendo la matriz T_b .

La solución de la posición y orientación puede ser resuelta por varios métodos: Transformación inversa, Paul et al. [1981]; screw algebra, Kohli y Soti [1975]; matrices dobles Denavit [1956]; quaternianas dobles Yang y Freudenstein [1964]; iterativo Uicker et al. [1964] y un enfoque geométrico Lee y Ziegler [1984]. En 1968 Pieper presentó la solución para cualquier brazo con 6 g.d.l., que tenga parejas de revoluta o prismáticas para las tres primeras uniones, y los ejes de las tres últimas uniones se intersecten en un solo punto. La solución puede expresarse como un polinomio de cuarto orden con una incógnita. La técnica proporcionada por Paul, es una transformación inversa que emplea las matrices de transformación de 4×4 para resolver la posición y orientación de los manipuladores que pertenezcan a la categoría del enfoque proporcionado por Pieper. La solución dada por transformación inversa es correcta, pero no siempre es la apropiada.

Es importante mencionar que para algún manipulador en particular, cierta posición y orientación puede lograrse de diferentes maneras, de aquí es obvio que otra pregunta es, que de todas las soluciones posibles, ¿Cuál es la mejor para una aplicación específica de brazo?. La pregunta anterior no la resuelve las matemáticas, esta es resuelta por el criterio del diseñador del brazo, en base a experiencia, limitaciones mecánicas, restricciones de espacio, que tan rápido desea que pase el brazo de una posición a otra, etc. El método de Pieper es fundamentado en la solución inversa de los ángulos de Euler. Uicker presenta un método de solución iterativa para la mayoría de los manipuladores industriales, enfoque parecido al empleado por Milenkovic y Huang en 1983. En las soluciones iterativas se requieren más cálculos, y desafortunadamente no garantizan una convergencia a la solución correcta, especialmente en casos degenerados y singulares. En esta técnica al igual que en el método de transformación inversa, no proporciona la manera de seleccionar la solución correcta para un brazo en particular. Considerando lo anterior, los brazos de la actualidad se diseñan para cumplir con las condiciones propuestas por Pieper para manipuladores de 6 g.d.l., siendo suficiente cumplir con una de las dos condiciones siguientes:

- i) Tres ejes de unión adyacentes que se intersecten; condición que cumplen los manipuladores PUMA y Stanford.
- ii) Tres ejes de unión adyacentes paralelos uno con respecto al otro; tal condición es cumplida por los brazos ASEA y MINIMOVER.

Considérese la submatriz de 3×3 proporcionada por (1-2.24), es claro que está en función de los Senos y Cosenos de $\theta_1, \dots, \theta_6$. Para cualquier manipulador con 6 g.d.l., se observa que T_6 posee 16 elementos, y tiene 6 incógnitas: tres para los ángulos de orientación, y tres para la posición. Es trivial que el sistema tiene más de una solución.

1-3.1 SOLUCIÓN MEDIANTE TRANSFORMACIÓN INVERSA

La técnica de transformación inversa, se refiere básicamente a resolver los ángulos de Euler para lograr la orientación deseada. El producto de (1-1.1), puede expresarse en términos de los vectores que definen la orientación del porta-herramientas, mediante la relación siguiente:

$$G_z, \phi, G_u, \theta, G_v, \Gamma = \begin{bmatrix} n_x & d_x & a_x \\ n_y & d_y & a_y \\ n_z & d_z & a_z \end{bmatrix} \quad (1-3.1)$$

Donde cada elemento es:

$$\begin{array}{lll} n_x = C\phi C\Gamma - S\phi C\theta S\Gamma & d_x = -C\phi S\Gamma - S\phi C\theta C\Gamma & a_x = S\phi S\theta \\ n_y = S\phi C\Gamma + C\phi C\theta S\Gamma & d_y = -S\phi S\Gamma + C\phi C\theta C\Gamma & a_y = -C\phi S\theta \\ n_z = S\theta S\Gamma & d_z = S\theta C\Gamma & a_z = C\theta \end{array}$$

Una solución para las nueve ecuaciones anteriores, es la siguiente:

$$\theta = C^{-1}(az) \quad (1-3.2)$$

$$\Gamma = C^{-1}[dz(S\theta)^{-1}] \quad (1-3.3)$$

$$\phi = C^{-1}[-ay(S\theta)^{-1}] \quad (1-3.4)$$

La solución anterior es inconsistente, o debe estar condicionada, debido a que el comportamiento de las funciones trigonométricas Seno y Coseno, pueden conducir a una ecuación indeterminada, o una solución ambigua por las siguientes razones:

- 1) Cuando $\theta \neq 0$, el $\text{Sen}(\theta) \neq 0$ también, lo cual produce una indeterminación en las dos últimas ecuaciones. Ahora cuando $\theta' = \pm \pi$ ocurre lo mismo, y se concluye que para tres posiciones angulares diferentes, no es posible obtener la solución debido a que $-1 \leq \text{Cos}(\theta) \leq 1$.
- 11) Por otra parte considerar el comportamiento de la función Coseno, ya que para dos ángulos simétricos se tiene un mismo valor. Esto es, se tiene que $\text{Cos}(\Gamma) = \text{Cos}(-\Gamma)$, lo cual conduce a una ambigüedad cuando se resuelve una ecuación que involucra a la función Coseno, ¿A que ángulo corresponde esta solución, al ángulo positivo o al ángulo negativo?

Estas son razones suficientes, para buscar un enfoque consistente para determinar la solución de los ángulos de Euler. La solución es emplear otra función trigonométrica. El uso de la función ArcoTangente, es un método apropiado para encontrar el valor de $-\pi \leq \theta \leq \pi$, mediante $\text{Tan}^{-1}(x,y)$, es fácil resolver el valor del ángulo θ usando $\text{Tan}^{-1}(y/x)$. Para ubicar el cuadrante donde el ángulo θ se localiza, es en base a las reglas siguientes:

$\theta = \text{T}^{-1}(y,x) =$	$0^\circ \leq \theta < 90^\circ$	para +x +y;	Primer cuadrante
	$90^\circ < \theta \leq 180^\circ$	para -x +y;	Segundo cuadrante
	$-180^\circ \leq \theta < -90^\circ$	para -x -y;	Tercer cuadrante
	$-90^\circ < \theta < 0^\circ$	para +x -y;	Cuarto cuadrante

De las reglas anteriores hay que poner especial cuidado para los ángulos de $\pm 90^\circ$, ya que para esos casos especiales cuando $\theta = \pm 90^\circ \Rightarrow \text{Tan}(\theta) = \pm \infty$. Al tomar (1-1.1) igualándola con (1-3.1), y premultiplicando por la matriz $[\theta z, \phi]^{-1}$, es posible encontrar la solución angular.

GEOMETRIA DEL MOVIMIENTO

Al igualar (1-1.1) con (1-3.1), se observa que los valores que definen la orientación del manipulador son datos conocidos, y que las tres incógnitas a resolver son los ángulos (ϕ, θ, Γ) , ahora premultiplicando ambos miembros de la igualdad por $[G_z, \phi]^{-1}$ se llega a:

$$\begin{bmatrix} C\phi & S\phi & 0 \\ -S\phi & C\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & d_x & a_x \\ n_y & d_y & a_y \\ n_z & d_z & a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\theta & -S\theta \\ 0 & S\theta & C\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C\Gamma & -S\Gamma & 0 \\ S\Gamma & C\Gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Efectuando los productos anteriores, se obtiene:

$$\begin{bmatrix} C\phi n_x + S\phi n_y & C\phi d_x + S\phi d_y & C\phi a_x + S\phi a_y \\ -S\phi n_x + C\phi n_y & -S\phi d_x + C\phi d_y & -S\phi a_x + C\phi a_y \\ n_z & d_z & a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C\Gamma & -S\Gamma & 0 \\ C\theta S\Gamma & C\theta C\Gamma & -S\theta \\ S\theta S\Gamma & S\theta C\Gamma & C\theta \end{bmatrix} \quad (1-3.5)$$

De esta última ecuación, nótese que en un solo producto quedó resuelto el vector A, de posiciones angulares para lograr la orientación deseada. Donde se tiene que una solución es:

$$C\phi a_x + S\phi a_y = 0 \Rightarrow \frac{S\phi}{C\phi} = \frac{a_x}{-a_y} \therefore T\phi = \frac{a_x}{-a_y}$$

$$\phi = T^{-1} [a_x (-a_y)^{-1}] \quad (1-3.6)$$

Ahora sabiendo que $a_z = C\theta$ se tiene \Rightarrow que:

$$S\theta = S\phi a_x - C\phi a_y$$

Por lo que resolviendo para el ángulo θ , se llega a:

$$\theta = T^{-1} [(S\phi a_x - C\phi a_y) (a_z)^{-1}] \quad (1-3.7)$$

Nótese lo sencillo que es resolver los valores de los ángulos posicionales por medio de esta técnica, pero desafortunadamente la solución no es única, y esta depende de la manera en que el algoritmo es inicializado.

GEOMETRIA DEL MOVIMIENTO

Finalmente se obtiene el valor de Γ , sabiendo que:

$$S\Gamma = -C\phi d_x - S\phi d_y$$

$$C\Gamma = C\phi n_x + S\phi n_y$$

Se llega a:

$$\Gamma = T^{-1} [(-C\phi d_x - S\phi d_y) (C\phi n_x + S\phi n_y)^{-1}] \quad (1-3.8)$$

La solución lograda mediante esta técnica, depende enteramente de como se inicie el algoritmo. Considérese ahora que en vez de premultiplicar, se postmultiplica por $(S_w \Gamma)^{-1}$, la solución lograda es diferente a la obtenida previamente. Por lo que únicamente expresando los resultados finales, se tiene que cada uno de los ángulos estará definido por:

$$\Gamma = T^{-1} [n_x (d_x)^{-1}] \quad (1-3.9)$$

$$\phi = T^{-1} [(C\Gamma n_y - S\Gamma d_y) (C\Gamma n_x - S\Gamma d_x)^{-1}] \quad (1-3.10)$$

$$\theta = T^{-1} [(S\Gamma n_x + C\Gamma d_x) (a_x)^{-1}] \quad (1-3.11)$$

La selección de como inicializar el algoritmo depende del criterio del diseñador del sistema, en base a las restricciones dictadas para cada caso.

1-3.2 SOLUCIÓN MEDIANTE EL ENFOQUE GEOMÉTRICO

En esta parte se presentará la solución de la posición-orientación mediante un enfoque geométrico para un manipulador de 6 g.d.l., con uniones de revoluta con una morfología parecida a la humana. Técnica basada en la anatomía del brazo humano, y los sistemas coordenados de los enlaces. Este manipulador se presenta en diferentes configuraciones definidas por tres indicadores.

Tales indicadores son el brazo, el codo, y la muñeca. Dos asociados con la solución de las tres primeras uniones, y el restante con las tres últimas.

Los dos primeros indicadores, conducen a determinar una solución a partir de las cuatro posibles para las tres primeras articulaciones. Análogamente, el tercer indicador decide una solución, de las dos posibles para las tres últimas articulaciones.

Los indicadores de la configuración de brazo, son especificados por el usuario para encontrar la solución inversa, calculada en dos etapas. Primero, un vector de posición apuntando de el hombro hacia la muñeca es definido, para obtener la solución para las tres primeras articulaciones, mediante la proyección del vector de posición en el plano $x_{i-1} y_{i-1}$. Y las tres últimas articulaciones son resueltas a partir de la solución de las tres primeras uniones, las submatrices de orientación de 0T_i , las matrices ${}^{i-1}D_i$ cuando $i = 4, 5, 6$, y la proyección de los sistemas dextrógiros de los enlaces en el plano $x_{i-1} y_{i-1}$. A partir de la geometría es factible encontrar fácilmente la solución de la posición-orientación. Además es posible verificar la solución angular, ya que los indicadores de la configuración de brazo pueden ser determinados a partir de las ecuaciones de decisión correspondientes, las cuales están en función de los ángulos de unión. Mediante modificaciones y ajustes apropiados, esta técnica puede generalizarse para resolver la solución de la posición-orientación para la gran mayoría de los manipuladores industriales de la actualidad, que posean uniones de revoluta.

Ahora si el manipulador es relacionado con otro sistema de referencia, usando la transformación R , y tiene una herramienta en la placa de montaje de la última articulación con su posición y orientación definida por una matriz H , se obtiene la matriz de herramienta, que relaciona la herramienta con algún sistema no perteneciente a la base del brazo, usando la relación siguiente:

$$\text{referencia}_H \text{herramienta} = R {}^0T_6 H \quad (1-3.12)$$

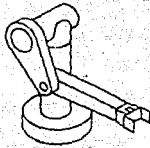
$$\text{donde } R = \text{referencia}_D \text{-} H_0 \text{ y } H = {}^6D \text{-} \text{herramienta}$$

Si la matriz $\text{referencia}_H \text{herramienta}$ es conocida, es posible ahora encontrar la matriz 0T_6 que relaciona el sistema cartesiano del porta-herramientas con el sistema de la base, mediante la premultiplicación por la matriz R^{-1} ; y la postmultiplicación por H^{-1} . Lográndose la siguiente relación:

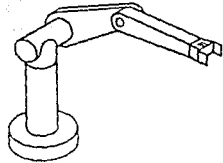
$${}^0T_6 = R^{-1} [\text{referencia}_H \text{herramienta}] H^{-1} = \begin{bmatrix} n_x & d_x & a_x & p_x \\ n_y & d_y & a_y & p_y \\ n_z & d_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1-3.13)$$

La aplicación del enfoque geométrico, es fundamentada en la proyección del sistema $(X_{i+1}, Y_{i+1}, Z_{i+1})$ sobre el plano $X_i Y_i$, y mediante trigonometría se obtienen las funciones $\text{Sen}(\theta_i)$ y $\text{Cos}(\theta_i)$, para calcular $\theta_i = T^{-1}(\text{Sen}_i)(\text{Cos}_i)^{-1}$.

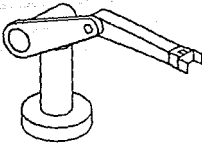
Los sistemas cartesianos se establecen acordes con la convención D-H. La figura 1.3-1, muestra algunas de las diferentes morfologías que puede adoptar la cadena manipuladora.



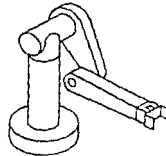
Brazo inferior derecho



Brazo superior izquierdo



Brazo superior derecho



Brazo inferior izquierdo

Figura 1.3-1 Topologías de las diferentes configuraciones de brazo.

Con respecto a las anteriores configuraciones para manipuladores, se tiene que los indicadores de configuración para el manipulador son el brazo y codo, estos dos indicadores son combinados para seleccionar una solución de las cuatro posibles soluciones de unión para las tres primeras articulaciones.

Para cada una de las configuraciones de la figura 1.3-1, definidas mediante los dos indicadores anteriores, se tiene a la muñeca como un tercer indicador, el cual proporciona una de dos posibles soluciones para las tres últimas articulaciones. Los tres indicadores para la configuración del manipulador se definen como:

$$\begin{aligned}
 \text{BRAZO} &= B \quad \left\{ \begin{array}{l} + \text{ Brazo de hombro derecho} \\ - \text{ Brazo de hombro izquierdo} \end{array} \right. \\
 \text{CODO} &= C \quad \left\{ \begin{array}{l} + \text{ Brazo superior} \\ - \text{ Brazo inferior} \end{array} \right. \\
 \text{MUÑECA} &= M \quad \left\{ \begin{array}{l} + \text{ Muñeca arriba} \\ - \text{ Muñeca abajo} \end{array} \right.
 \end{aligned}$$

Partiendo de la figura y parámetros cinemáticos del manipulador, se define un vector de posición p , el cual apunta desde el sistema dextrógiro (X_0, Y_0, Z_0) , perteneciente al hombro del brazo, hacia el punto donde los ejes de las tres últimas articulaciones se intersectan, tal como se aprecia en la figura 1.2-6.

$$p = p_6 - d_6a = (p_x, p_y, p_z)^T$$

Obsérvese que el vector dado por la relación anterior, corresponde al vector de posición de T_4 , por lo que en forma matricial queda de la forma:

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1(a_2C_2+a_3C_2+d_4S_2)-d_2S_1 \\ S_1(a_2C_2+a_3C_2+d_4S_2)+d_2C_1 \\ d_4C_2-a_3S_2-a_2S_2 \end{bmatrix} \quad (1-3.14)$$

Con los preliminares anteriores, es posible ahora encontrar la solución de la posición-orientación, para las tres primeras articulaciones.

- I) SOLUCIÓN PARA LA PRIMERA ARTICULACIÓN. Si el vector p que parte del sistema (X_0, Y_0, Z_0) y llega a la intersección de las tres últimas articulaciones es proyectado en el plano X_0Y_0 , y mediante trigonometría se encuentran las funciones S_01 y C_01 . Es claro que $\alpha_1 = T^{-1}(S_01)(C_01)$, aquí solo existen dos posibilidades y una es de que α_1 pertenezca a la configuración de brazo derecho o izquierdo.
- II) SOLUCIÓN PARA LA SEGUNDA ARTICULACIÓN. Proyectando el vector p dentro del plano X_1Y_1 , se encuentra en forma análoga el ángulo α_2 . Aquí se tienen dos posibilidades debido a la ubicación de la articulación, una es de brazo superior y la otra es de brazo inferior. La tabla 1.3-1 muestra las cuatro diferentes configuraciones de brazo debido a las diferentes mezclas Brazo-Codo, como se muestra en la tabla.

TABLA 1.3-1: CONFIGURACIONES DE BRAZO DEFINIDAS POR LA SEGUNDA UNIÓN

Configuración del brazo	
Brazo superior	hombro derecho
Brazo superior	hombro izquierdo
Brazo inferior	hombro derecho
Brazo inferior	hombro izquierdo

- III) SOLUCIÓN PARA LA TERCERA ARTICULACIÓN. Proyectando el vector p , sobre el plano X_2Y_2 , se obtiene el ángulo $\alpha_3 = T^{-1}(S_03)(C_03)$.

Una vez que se tienen resueltos los tres primeros ángulos, los cuales ubican la muñeca del manipulador, ahora se encuentran los ángulos de orientación.

- IV) SOLUCIÓN PARA LA CUARTA ARTICULACIÓN. Las orientación arriba o abajo para la muñeca se definen acorde a la orientación del sistema fijo del porta-herramientas, con respecto al sistema (Xs, Ys, Zs) . El ángulo es nuevamente calculado mediante la proyección de este último marco sobre el plano $XsYs$, y finalmente $\alpha_4 = T^{-1}(S\alpha_4)(C\alpha_4)^{-1}$. La tabla 1-3.2 muestra las dos combinaciones de muñeca. Por lo que las combinaciones totales de Brazo-Codo-Muñeca, son ocho. El número de posibles permutaciones. Implica que existen ocho soluciones para un brazo 6R debido a su morfología.

TABLA 1.3-2 COMBINACIONES POSIBLES PARA LA MUÑECA

Orientación de muñeca
Muñeca arriba
Muñeca abajo

- V) SOLUCIÓN PARA LA QUINTA ARTICULACIÓN. Para resolver α_5 , el sistema (Xs, Ys, Zs) es proyectado sobre el plano $XsYs$, y nuevamente se tiene que $\alpha_5 = T^{-1}(S\alpha_5)(C\alpha_5)^{-1}$.
- VI) SOLUCIÓN PARA LA SEXTA ARTICULACIÓN. Nuevamente proyectando el marco (X_6, Y_6, Z_6) sobre el plano $XsYs$, se obtiene el ángulo α_6 .

Con la solución de la sexta articulación, se completa la solución total para ubicar el porta-herramientas con la posición y orientación deseada. Para el caso especial de que $\alpha_1 = \pm 90^\circ$, la función $\tan(\alpha_1) = \pm \infty$, y cuando se presenta tal situación se le denominará degenerado. Por lo que se tienen dos casos que no tienen solución:

- I) Caso singular: no se logra la posición u orientación por la geometría del brazo, debido a restricciones mecánicas.
- II) Caso degenerado: matemáticamente no tiene solución para articulaciones que requieran ángulos rectos, aunque geoméricamente se pueda lograr.

En la parte dedicada a la mecánica de fuerza-movimiento, se hará el análisis del sistema variante en el tiempo, donde se considerarán los torques, pares o fuerzas necesarias en cada articulación para mover el manipulador.

CAPITULO DOS: MECANICA DE FUERZA-MOVIMIENTO

2-1 ECUACIONES DE LAGRANGE-EULER

Las ecuaciones de movimiento de un manipulador pueden expresarse a través de la aplicación directa de la formulación de Lagrange-Euler, para sistemas no-conservativos.

Un cuerpo rígido puede considerarse como un número infinito de partículas distribuidas en forma homogénea, y la distancia que las separa es invariante, bajo esta consideración es posible extender las ecuaciones de movimiento de la partícula, a cualquier cuerpo rígido. Similarmente las ecuaciones de Lagrange se pueden aplicar a los cuerpos rígidos, y en el caso de un manipulador a cadenas de cuerpos rígidos. Siendo i , el número de coordenadas generalizadas del sistema, y T_i el número de fuerzas actuando en el sistema. Las ecuaciones de movimiento que describen la dinámica de la cadena, se encuentran usando la energía cinética y potencial del manipulador.

Mediante la representación de D-H y el Lagrangiano, es posible determinar las ecuaciones de movimiento que gobiernan al manipulador en base al tiempo y la geometría del brazo para obtener el modelo que será usado en el sistema de control. La obtención de las ecuaciones de movimiento considerando los pares o fuerzas necesarios en cada una de las articulaciones es basada en:

- i) Deben conocerse las matrices ${}^{i-1}DH_i$, para todos los enlaces.
- ii) Las ecuaciones de Lagrange-Euler debe calcularse para obtener la fuerza o torque aplicado a cada una de las articulaciones para alcanzar el movimiento deseado. El par es se calcula con la siguiente relación:

$$T_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{v}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial v_i} \quad i=1,2,\dots,n.g.d.1. \quad (2-1.1)$$

Donde cada elemento de la relación anterior es:

- L = Función lagrangiana ($E_c - E_p$)
- E_c = Energía cinética total del manipulador
- E_p = Energía potencial total del manipulador
- v_i = Coordenadas generalizadas del manipulador
- \dot{v}_i = Primera derivada de las coordenadas generalizadas
- T_i = Torque, o fuerza aplicada a la i -ésima unión para mover el enlace i

A partir de la ecuación de Lagrange-Euler deben seleccionarse apropiadamente un conjunto de coordenadas generalizadas para describir el sistema. Las posiciones angulares son fácilmente medibles, y además tienen una natural correspondencia con las coordenadas generalizadas. Así se tiene que para una unión de revoluta es conveniente dejar $v_i = \theta_i$, que es la apertura del ángulo.

Para una unión del tipo prismático se deja $p_i \approx d_i$ que es la distancia que recorre la articulación. Las ecuaciones de Lagrange se basan en conocer las velocidades de las articulaciones, para obtener la energía cinética del sistema de cuerpos rígidos, y posteriormente calcular la energía total de la cadena.

2-1.1 VELOCIDADES DE ARTICULACIÓN PARA LA CADENA MANIPULADORA

El enfoque de L-E necesita el conocimiento de la energía cinética de todo el sistema físico que representa al manipulador, energía que depende de la velocidad de cada unión. La velocidad de un punto fijo al enlace 1 se calcula, y los efectos de producidos en ese enlace debido al movimiento de las otras uniones, son analizados. Considérese la figura 2.1-1, que muestra un brazo 6R, dejese un punto 1p_i fijo al enlace 1, expresado en coordenadas homogéneas con respecto a su propio enlace, se tiene:

$${}^1p_i = (x_i, y_i, z_i, 1)^T \quad (2-1.2)$$

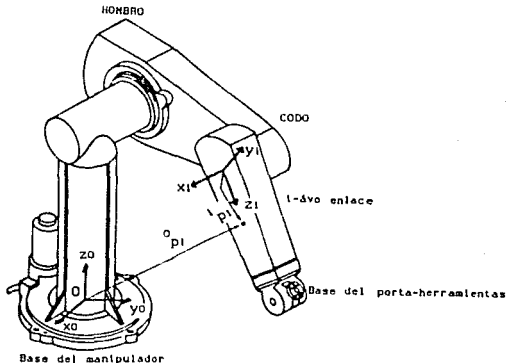


Figura 2.1-1 Posición del punto 1p_i en el enlace 1.

Expresando el mismo punto referenciado al sistema de la base denotado por 0p_i y mediante la transformación de D-H, se tiene la relación siguiente:

$${}^0p_i = {}^0DH_1 {}^1p_i \quad (2-1.3)$$

Si se tiene una articulación de revoluta, debe considerarse la relación dada por (1-2.14). Y para una unión prismática debe usarse la relación (1-2.17).

Para el caso más general todos los elementos no-cero de la matriz ${}^0D_{H1}$, están en función de $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_1)$, y los parámetros geométricos a_i , l_i y d_i son conocidos. El caso general de ecuaciones de fuerza-movimiento incluye ambos tipos de uniones, por lo que haciendo un cambio de variable, es posible expresarlas en una sola ecuación mediante las coordenadas generalizadas p_i , las cuales son θ_i para la articulación de revoluta, y d_i para la unión prismática.

Bajo la consideración de que 1p_1 está en reposo en el enlace 1, y además que el enlace es un cuerpo idealmente rígido, otros puntos al igual que 1p_1 , que estén fijos al mismo enlace, y expresados con respecto al i -ésimo marco, tendrán una velocidad cero con respecto al marco 1. Es posible expresar la velocidad de 1p_1 con respecto al marco de la base, mediante:

$${}^0v_1 = v_1 = \frac{d}{dt} \left({}^0p_1 \right) = \frac{d}{dt} \left({}^0D_{H1} {}^1p_1 \right) \quad (2-1.4)$$

$$v_1 = {}^0D_{H1} {}^1D_{H2} \dots {}^{i-1}D_{H1} {}^i p_1 + {}^0D_{H1} {}^1D_{H2} \dots {}^{i-1}D_{H1} {}^i p_1 + \dots \\ \dots {}^0D_{H1} \dots {}^{i-1}D_{H1} {}^i p_1 + {}^0D_{H1} {}^i p_1$$

Donde ${}^{i-1}D_{H1}$ es la primera derivada de la matriz homogénea de coordenadas adyacentes. Considerando que para un cuerpo rígido ${}^i p_1 = 0$, es ahora posible expresar la relación anterior mediante una sumatoria, llegándose a:

$$v_1 = \left(\sum_{j=1}^i \frac{\partial {}^0D_{H1}}{\partial p_j} v_j \right) {}^1p_1 \quad (2-1.5)$$

De la relación anterior es posible ahora calcular la derivada parcial de ${}^0D_{H1}$ con respecto a p_j , usando la matriz C_i . Para una articulación de revoluta es definida por:

$$C_{R1} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2-1.6)$$

Es claro que existe el equivalente para una unión prismática de la forma:

$$C_{P1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2-1.7)$$

Por lo cual de (2-1.6) y (2-1.7) se concluye que:

$$\frac{\partial {}^{i-1}DH_i}{\partial p_i} = C_i {}^{i-1}DH_i \quad (2-1.8)$$

Es posible expresar la relación anterior para analizar los efectos dinámicos de la unión j , sobre todos los puntos del enlace i , mediante la relación:

$$\frac{\partial {}^0DH_i}{\partial p_j} = \begin{cases} {}^0DH_1 {}^1DH_2 \dots {}^{j-2}DH_{j-1} C_j {}^{j-1}DH_j \dots {}^{i-1}DH_i & \text{para } j \leq i \\ 0 & \text{para } j > i \end{cases} \quad (2-1.9)$$

Definiendo la primera parcial de 0DH_i con respecto a p_j , como $\tilde{\lambda}_{ij}$, se tiene:

$$\tilde{\lambda}_{ij} = \begin{cases} {}^0DH_1 {}^1C_j {}^{j-1}DH_i & \text{para } j \leq i \\ 0 & \text{para } j > i \end{cases} \quad (2-1.10)$$

Tomando la relación (2-1.5), v_i puede expresarse por:

$$v_i = \left(\sum_{j=1}^i \tilde{\lambda}_{ij} v_j \right) {}^i p_i \quad (2-1.11)$$

2-1.2 ENERGÍA CINÉTICA PARA LA CADENA MANIPULADORA

Una vez obtenida la velocidad de unión para cada articulación, es posible ahora calcular la energía cinética de cada uno de los enlaces. Déjese a la energía cinética del enlace i , como E_{ci} , expresada en base al sistema de la base. Ahora sea dE_{ci} la energía cinética de una partícula con una masa diferencial denotada por dm en el enlace i . Se llega a la relación siguiente:

$$dE_{ci} = \frac{1}{2} [\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2 + \dot{z}_i^2] dm \quad (2-1.12)$$

$$dE_{ci} = \frac{1}{2} \text{Traza}(v_i v_i^T) dm \quad (2-1.13)$$

El operador traza que aparece en (2-1.13) se usa en vez del producto punto, para obtener el tensor del cual se obtendrá la matriz de inercia de enlaces.

Tomando la relación (2-1.11), y sustituyendo en (2-1.13) se tiene que la diferencial de la energía cinética está dada por:

$$dE_{c1} = \frac{1}{2} \text{Traza} \left(\sum_{p=1}^1 \bar{\lambda}_{1p} v_p {}^1p_i \left[\sum_{r=1}^1 \bar{\lambda}_{1r} v_r {}^1p_i \right]^T \right) dm$$

$$dE_{c1} = \frac{1}{2} \text{Traza} \left(\sum_{p=1}^1 \sum_{r=1}^1 \bar{\lambda}_{1p} [{}^1p_i dm {}^1p_i^T] \bar{\lambda}_{1r}^T v_p v_r^T \right) \quad (2-1.14)$$

Integrando la relación (2-1.14) se tiene entonces que:

$$E_{c1} = \frac{1}{2} \text{Traza} \left(\sum_{p=1}^1 \sum_{r=1}^1 \bar{\lambda}_{1p} \left[\int {}^1p_i {}^1p_i^T dm \right] \bar{\lambda}_{1r}^T v_p v_r^T \right) \quad (2-1.15)$$

Como el término integral de (2-1.15) es la inercia para todos los puntos del enlace 1, se tiene entonces que:

$$I_1 = \int {}^1p_i {}^1p_i^T dm = \begin{bmatrix} \int x_1^2 & \int x_1 y_1 & \int x_1 z_1 & \int x_1 \\ \int x_1 y_1 & \int y_1^2 & \int y_1 z_1 & \int y_1 \\ \int x_1 z_1 & \int y_1 z_1 & \int z_1^2 & \int z_1 \\ \int x_1 & \int y_1 & \int z_1 & \int \end{bmatrix} dm \quad (2-1.16)$$

Por lo que finalmente usando la relación (2-1.15) y (2-1.16) se obtiene la energía cinética total de todas las partículas pertenecientes al manipulador:

$$E_c = \sum_{i=1}^n E_{ci} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \text{Traza} \left(\sum_{p=1}^1 \sum_{r=1}^1 \bar{\lambda}_{1p} I_1 \bar{\lambda}_{1r}^T v_p v_r^T \right) \quad (2-1.17)$$

La relación (2-1.17), es la energía cinética total para todos los enlaces que forman parte de cualquier manipulador. Por otra parte, el modelado dinámico se completa con el cálculo de la energía potencial de la cadena manipuladora.

2-1.3 ENERGÍA POTENCIAL PARA LA CADENA MANIPULADORA

La energía potencial del manipulador para cada uno de los enlaces es:

$$E_{p_i} = -m_i g^0 p_i = -m_i g^0 D H_i^{-1} p_i \quad (2-1.18)$$

Finalmente la energía potencial total es la suma de la energía asociada a cada enlace, por lo que la energía total es:

$$E_p = \sum_{i=1}^n E_{p_i} = \sum_{i=1}^n -m_i g^0 D H_i^{-1} p_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2-1.19)$$

Donde el g es el vector gravitacional expresado en el sistema de la base donde se tiene que: $g = (0, 0, -|g|, 0)$, en la dinámica del manipulador.

2-1.4 MODELADO DINÁMICO DE LA CADENA MANIPULADORA

Mediante la energía cinética y potencial del manipulador es posible obtener su Lagrangiano: $L = E_c - E_p$. Empleando las relaciones (2-1.17), y (2-1.19) se obtiene la función Lagrangiana del sistema de enlaces interconectados:

$$L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \left[\text{Traza} \left(\tilde{\lambda}_{ij} J_i \tilde{\lambda}_{ik}^T \right) v_j v_k^T \right] + \sum_{i=1}^n m_i g^0 D H_i^{-1} p_i \quad (2-1.20)$$

Tomando la relación (2-1.1) y (2-1.20) se obtienen las ecuaciones que definen la dinámica del manipulador:

$$\ddot{T}_i = \sum_{k=1}^n J_{ik} \ddot{v}_k + \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^n C_{ikm} v_k v_m + G_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2-1.21)$$

Expresando matricialmente a (2-1.21):

$$\ddot{T} = J(p)a + C(p, v)v + G(p) \quad (2-1.22)$$

Donde:

- $\ddot{T} \in n \times 1$, vector de pares aplicados a las n articulaciones
- $J(p) \in n \times n$, matriz simétrica de inercia
- $C(p, v) \in n \times n$, matriz de fuerzas centrífugas y aceleración de Coriolis
- $G(p) \in n \times 1$, vector gravitacional
- $p \in n \times 1$, vector de las posiciones para las n articulaciones
- $v \in n \times 1$, vector de velocidades para las n articulaciones
- $a \in n \times 1$, vector de aceleraciones para las n articulaciones

La forma dada por (2-1.22) es el modelo dinámico empleado en los sistemas de control mostrados en el presente trabajo. Es posible obtener la dinámica del manipulador usando un enfoque Newtoniano, y el principio D'Alembert.

2-2 CADENA MANIPULADORA CON DOS G.D.L.

En esta sección se presenta el modelo dinámico para una cadena con movimiento planar y dos g.d.l., donde las ecuaciones dinámicas tienen la estructura dada por (2-1.22) para describir las relaciones de fuerza-movimiento que gobiernan al sistema mecánico representado en la figura 2.2-1. Donde el modelo dinámico se encuentra con la aplicación directa de la relación (2-1.21), y usando la siguiente notación: $C_i = \cos(p_i)$, $C_{ij} = \cos(p_i + p_j)$.

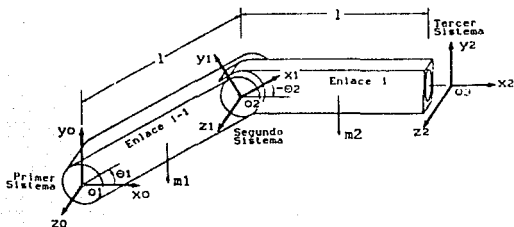


Figura 2.2-1 Cadena mecánica planar con dos enlaces.

Finalmente el modelo dinámico en la forma dada por la relación (2-1.22) es:

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ \chi & \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c & \phi \\ \gamma & \eta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda \\ \mu \end{bmatrix} \quad (2-1.23)$$

$$\alpha = l^2 \left(\frac{1}{3} m_1 + m_2 \left[\frac{1}{3} + C_2 \right] \right) \quad \beta = m_2 l^2 \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{2} C_2 \right)$$

$$\chi = m_2 l^2 \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{2} C_2 \right) \quad \delta = \frac{1}{3} m_2 l^2$$

$$c = -m_2 l^2 S_2 v_2 \quad \phi = -\frac{1}{2} m_2 l^2 S_2 v_2 \quad \gamma = \frac{1}{2} m_2 l^2 S_2 v_1 \quad \eta = 0$$

$$\lambda = \frac{1}{2} g l \left(m_1 C_1 + m_2 [C_{12} + 2m_2 C_1] \right) \quad \mu = \frac{1}{2} g l m_2 C_{12}$$

3-1 PRELIMINARES MATEMÁTICOS

Cuando se analizan sistemas dinámicos lineales, invariantes, SISO, y no acoplados, estos pueden representarse mediante ecuaciones I-D, lineales, y ordinarias. En estos casos, la ecuación dinámica del proceso puede expresarse en su equivalente en el dominio de Laplace, lo cual logra que la ecuación I-D sea representada como una ecuación algebraica, la que conduce al concepto de función de transferencia. Mediante la función de transferencia es posible describir el comportamiento dinámico del sistema, en base a la ubicación de los polos del sistema, y el tipo de excitaciones a las que la planta no es capaz de responder en base a la ubicación de los ceros.

El análisis basado en el parámetro s , el cual es un análisis en el dominio de la frecuencia permite conocer el comportamiento de la planta mediante el plano complejo.

Ahora como la dinámica del manipulador está modelada mediante I-D no-lineales acopladas, MIMO, y variantes en el tiempo, los métodos convencionales de análisis: lugar de las raíces, traza de Bode, carta de Nichols, Nyquist, y demás métodos de control convencional, no son aplicables al estudio de control de manipuladores.

Los métodos usados en este trabajo están basados en el dominio del tiempo, donde la estabilidad de las ecuaciones dinámicas que modelan al manipulador, y en general cualquier ecuación I-D no-lineal, es en base al plano de fase. En un segundo término se analizará la estabilidad en el sentido de Lyapunov, esto lleva a un análisis para garantizar el objetivo de control de movimiento, en base a una función definida positiva, y no-creciente.

3-1.1 ESTABILIDAD MEDIANTE EL PLANO DE FASE

Considérese la ecuación diferencial no lineal de la forma:

$$d^2x = F\left[x, \frac{dx}{dt}\right]dt^2 \quad (3-1.1A)$$

Si en la relación (3-1.1A) se deja $y = dx/dt$, es posible expresarla mediante el sistema equivalente:

$$\begin{aligned} dx/dt &= y \\ dy/dt &= F(x, y) \end{aligned} \quad (3-1.2A)$$

El sistema equivalente (3-1.2A) es usado para estudiar el comportamiento dinámico del sistema (3-1.1A), mediante el plano de fase.

Ahora es posible hacer un análisis del sistema descrito por (3-1.1A), mediante el sistema (3-1.2A) en un plano de coordenadas rectangulares x , y .

La relación (3-1.2A) se denomina E-D autónoma, cuando esta no depende explícitamente del tiempo y es posible graficar su plano de fase $y(x)$, si se obtiene la siguiente relación para eliminar el tiempo: $y/F(x, y)$.

En su forma más general las ecuaciones diferenciales no-lineales son de la forma:

$$\begin{aligned} dx/dt &= P(x, y) \\ dy/dt &= Q(x, y) \end{aligned} \quad (3-1.3A)$$

Donde P y Q tienen primeras derivadas parciales continuas $\forall (x, y)$.

Definición 3.1PF

Dado un sistema autónomo de la forma (3-1.3A), el punto (x_0, y_0) en el que ambas funciones $P(x_0, y_0) = 0$, y $Q(x_0, y_0) = 0$, se llama punto crítico.

Definición 3.2PF

Considere que $(0, 0)$ es un punto crítico aislado del sistema (3-1.3A). Sea T su trayectoria en el plano de fase, déjese $x = f(t)$, $y = g(t)$ como solución al sistema y definiendo a T paramétricamente, entonces la distancia entre $(0, 0)$ y el punto $R: [f(t), g(t)]$ sobre la trayectoria T será:

$$D(t) = \left(f(t)^2 + g(t)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3-1.4A)$$

Se tiene entonces que el punto crítico es llamado estable para cualquier $\epsilon > 0$, si existe un $\delta > 0$ tal que $D(t_0) < \delta$ para algún valor de t_0 , y es definida para todo $t \geq t_0$ de tal forma que $D(t) < \epsilon$, para $t_0 \leq t < \infty$.

Definición 3.3PF

Un punto crítico se denomina asintóticamente estable, si es estable y además existe un número $\delta_0 > 0$, tal que $D(t_0) < \delta_0$. Por lo que se tiene que:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} g(t) = 0$$

Definición 3.4PF

Un punto crítico se denomina inestable, cuando este no es estable.

Existen dos puntos críticos asintóticamente estables llamados nodo y espiral debido a la trayectoria seguida en su plano de fase. Cuando el sistema es inestable la trayectoria en el plano de fase es una silla de montar.

3-1.2 ESTABILIDAD EN EL SENTIDO DE LYAPUNOV

En los sistemas dinámicos conservativos se tiene que si la energía potencial tiene un mínimo en el punto crítico, entonces este punto es estable, y de cualquier otra manera es inestable. Tal principio fué generalizado por el matemático de origen Ruso Lyapunov para obtener un método usado en el estudio de la estabilidad de sistemas autónomos. El proceso de análisis se denomina método directo de Lyapunov, este se refiere a que no es necesario tener previo conocimiento acerca de las soluciones del sistema (3-1.3A), o saber que tipo de punto crítico posee. Por otra parte, uno es capaz de proponer o construir funciones de Lyapunov para sistemas no-lineales, las cuales garantizan que el sistema será llevado a su mínimo estado de energía. Sin embargo debe ser considerado que no hay un método general para construir funciones de Lyapunov.

Definición 3.1EL.

Supongase $E(x, y)$ tenga primeras derivadas parciales continuas en todos los puntos (x, y) en el dominio D , y además $(0, 0) \in D$. Se tiene entonces:

- i) E es definida positiva en D , si $E(0, 0) = 0$ y $E(x, y) > 0 \quad \forall (x, y) \in D$.
- ii) E es semidefinida positiva si $E(0, 0) = 0$ y $E(x, y) \geq 0 \quad \forall (x, y) \in D$.
- iii) E es definida negativa si $E(0, 0) = 0$ y $E(x, y) < 0 \quad \forall (x, y) \in D$.
- iv) E es semidefinida negativa si $E(0, 0) = 0$ y $E(x, y) \leq 0 \quad \forall (x, y) \in D$.

Definición 3.1EL.

Suponga que $E(x, y)$ tiene primeras derivadas parciales continuas en todos los puntos (x, y) en un dominio D , y además $(0, 0) \in D$. La derivada de E , con respecto al sistema (3-1.3A) es la función \dot{E} definida por:

$$\dot{E}(x, y) = \frac{\partial E(x, y)}{\partial x} P(x, y) + \frac{\partial E(x, y)}{\partial y} Q(x, y) \quad (3-1.1B)$$

Definición 3.2EL.

Considérese el sistema descrito por (3-1.3A), supóngase que el sistema tiene un punto crítico aislado en $(0, 0)$, y que P y Q tienen primeras derivadas parciales continuas para todo (x, y) . Déjese $E(x, y)$ sea definida positiva para todo (x, y) en el dominio D que contiene al origen, de tal forma que \dot{E} sea semidefinida negativa para todo $(x, y) \in D$. Entonces se dice que $E(x, y)$ es una función de Lyapunov en D para el sistema (3-1.3A).

Teorema 3.2EL.

Considérese el sistema (3-1.3A), suponer que tiene un punto crítico aislado en el origen. Si P y Q cumplen con 3.1EL, y si existe una función de Lyapunov E , para el sistema el algún dominio D y $(0, 0) \in D$, entonces el punto crítico $(0, 0)$ para (3-1.3A) es estable.

Teorema 3.3EL.

Si existe una función E que cumple con 3.2EL, y que además su derivada \dot{E} definida por (3-1.1B) es definida negativa en el dominio D , entonces el punto crítico $(0, 0)$ del sistema (3-1.3A) es asintóticamente estable.

3-1.3 ESPACIOS LP

Bajo la consideración de que se conoce la definición y condiciones necesarias que definen a un espacio lineal, se principiará con el estudio de los espacios L_p . Un espacio L_p es un espacio formado con elementos que son funciones con propiedades usadas para el análisis de sistemas dinámicos.

En el análisis de sistemas dinámicos interconectados, los espacios denotados por: L_1^2 , L_2^∞ , son importantes para obtener el comportamiento del sistema mediante el enfoque de entrada-salida.

Definición 3.1LP

El espacio lineal L_2 es el conjunto de todas las funciones $f: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}$ que cumplen con la siguiente desigualdad:

$$\int_0^{\infty} |f(t)|^2 dt < \infty$$

Definición 3.2LP

El espacio L_∞ es el conjunto de todas las funciones $f: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}$, tales que estas sean acotadas.

Lema 3.1LP

Sea $f: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}^n$. Si $f \in L_2^2$ y $\dot{f} \in L_\infty^2 \rightarrow f(t) \rightarrow 0$ cuando $t \rightarrow \infty$

Lema 3.2LP

Considerar las funciones continuas y diferenciables $\xi: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}^m$ y $\vartheta: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}_+$. Defínase una función $\zeta: \mathbb{R}^{m+1} \rightarrow \mathbb{R}_+$ por la relación:

$$\zeta(\xi, \vartheta) = \xi(t)^T [\Xi_1 \xi(t)] + \vartheta(t) \geq 0$$

Donde $\Xi_1 \in \mathbb{R}^{m \times m}$ es una matriz simétrica definida positiva. Ahora si existe una función $\theta: \mathbb{R} \rightarrow S$, donde S es un subespacio de \mathbb{R}^m de dimensión $p \leq m$, tal que la derivada de ζ , con respecto al tiempo, satisface la relación:

$$\dot{\zeta}(\xi, \vartheta) = -\theta(t)^T [\Xi_2 \theta(t)] \leq 0 \quad \Xi_1 = \Xi_2^T > 0 \text{ se tiene } \rightarrow \text{ que:}$$

- i) $\xi \in L_\infty^m$
- ii) $\vartheta \in L_\infty$
- iii) $\theta \in L_2^p$

Lema 3.3LP

Considerar la matriz $H(s) \in \mathbb{R}^{n \times n}(s)$, con elementos que son funciones racionales, estrictamente propias, y de variable compleja s . Suponer que los denominadores de sus elementos tienen todas sus raíces en el semiplano complejo izquierdo, se tienen dos conclusiones:

- I) Si $u \in L_2^2 \rightarrow y = L^{-1}(H)u \in L_2^2 \cap L_\infty^n$; $\dot{y} \in L_2^2$; además $y(t) \rightarrow 0$ si $t \rightarrow \infty$
- II) Si $u \in L_\infty^2 \rightarrow L^{-1}(H)u \in L_\infty^n$; $\dot{y} \in L_\infty^2$.

Corolario 3.1LP

Bajo el lema 3.3LP, $H(s) \in \mathbb{R}^{n \times n}(s)$, si $u \in L_2^2 \cap L_\infty^n$, se tiene \rightarrow
 $y = L^{-1}(H)u \in L_2^2 \cap L_\infty^n$; $\dot{y} \in L_2^2 \cap L_\infty^n$; además $y(t) \rightarrow 0$ si $t \rightarrow \infty$

3-1.4 PROPIEDADES DEL MODELO DINÁMICO DEL MANIPULADOR**Propiedad 3.1MD**

El modelo dinámico (2-1.22) puede expresarse en términos de un vector θ que solo depende de los parámetros dinámicos del manipulador y su carga. Por lo que la ecuación dinámica puede reescribirse de la siguiente manera:

$$Y(p, v, \alpha)\theta = I(p)\alpha + C(p, v)v + G(p) \quad (3-1.1D)$$

Propiedad 3.2MD

La matriz de inercia $I(p)$ es una matriz cuadrada, simétrica, definida positiva, y además existe una constante real positiva κ , de tal forma que:

$$\kappa I \leq I(p) \quad \text{para todo } p \in \mathbb{R}^n \quad (3-1.2D)$$

Propiedad 3.3MD

La matriz $C(p, v)$ de fuerzas centrífugas y aceleración de Coriolis, donde el acoplamiento de $C(p, v)$ es independiente de p , pero este se incrementa en forma cuadrática con la v . La matriz de fuerzas centrífugas y de Coriolis, si es definida adecuadamente, esta se relaciona con la matriz de inercia $I(p)$ por:

$$X^T [\dot{I}(p) - 2C(p, v)]X = 0 \quad (3-1.3D)$$

lo anterior implica que $\dot{I}(p) - 2C(p, v)$ es una matriz antisimétrica.

Con los preliminares expuestos, es posible ahora analizar los tres esquemas de control que serán presentados.

3-2 ALGUNAS ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA LOS MANIPULADORES

La primera aplicación de control en los manipuladores es en tareas de toma y coloca, donde el manipulador se desplaza libremente sin tener contacto con el medio ambiente y siguiendo una trayectoria de movimiento dentro de su volumen de trabajo. Una segunda aplicación son las tareas para los manipuladores que siguen trayectorias definidas como las tareas de soldadura y pintado. Las dos aplicaciones anteriores se logran mediante controles de posición pura. Ahora cuando la tarea del manipulador se complica, el objetivo de control es basado en interactuar el manipulador con el medio que le rodea, tal como ocurre en aplicaciones de pulido y armado. En aplicaciones donde el medio ambiente y el brazo están ligados, se usan controles híbridos: control de posición-fuerza.

Esta sección principiará analizando un control proporcional, posteriormente será estudiado un control que usa el modelo dinámico del manipulador: control de dinámica inversa +, y finalmente se tratará su versión adaptable.

Considérese el modelo dinámico de un manipulador de n grados de libertad, con enlaces rígidos, sin fricción en las articulaciones, e impulsores ideales:

$$\ddot{p} + C(p, \dot{p})\dot{p} + G(p) = \ddot{V} \quad (3-2.1)$$

El control de movimiento fundamentado en la relación (3-2.1) proporciona un conjunto de vectores acotados p_d , \dot{v}_d , \ddot{a}_d los cuales son la posición, velocidad, y aceleración deseadas en cada una de las articulaciones. El objetivo es determinar un vector \ddot{V} dependiente del tiempo, de tal forma que las posiciones de las uniones logren la posición deseada p_d , para cada una de ellas.

Matemáticamente el objetivo de control de movimiento es determinar \ddot{V} , para que el error entre la posición lograda y la deseada sea cero:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \delta(t) = 0$$

Donde $\delta(t)$ es el vector de los errores de posición en las articulaciones, esto es $\delta(t) = p_d(t) - p(t)$. Si el objetivo de control se logra, el manipulador es desplazado asintóticamente logrando la posición, o siguiendo la trayectoria deseada, un caso especial de control de posición consiste en la determinación de \ddot{V} , de tal forma que:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} p(t) = p_d$$

En el caso anterior es claro que el vector de posición deseada es invariante en el tiempo. En controladores que usan el modelo dinámico del manipulador se obtiene una ley de control calculando \ddot{V} , la cual es una ecuación vectorial no lineal expresada como:

$$\ddot{V} = \ddot{V}(t, p, \dot{p}, \ddot{a}, p_d, \dot{v}_d, \ddot{a}_d, \mathbb{H}(p)) \quad (3-2.2)$$

Donde es deseable que la ley de control no dependa de la aceleración.

CONTROL DEL MANIPULADOR

El los manipuladores el vector T de pares articulares se suministra a partir de los actuadores. En los manipuladores académicos y en los de baja potencia, los impulsores son motores eléctricos de C.D., C.A., y de pasos. Se usan preferentemente motores de C.D. acoplados mediante engranes, cremalleras, cadenas de rodillos, y tornillos sin-fin. Por simplicidad no será contemplada la dinámica de los actuadores. Las articulaciones del manipulador se dotan de sensores de posición y velocidad, por lo que p y v , son mesurables.

Dividiendo el estudio de los controladores en dos partes, se tiene a los controladores de parámetros fijos, y los de parámetros adaptables. Dentro de los controles con parámetros fijos pueden mencionarse los siguientes:

- i) Controlador P.
- ii) Controlador P más compensación de gravedad.
- iii) Controlador PD +.
- iv) Controlador PD más compensación.
- v) Controlador de dinámica inversa.
- vi) Controlador de dinámica inversa +.

En los controladores de parámetros adaptables se tienen:

- i) Controlador adaptable PD más compensación.
- ii) Controlador adaptable de dinámica inversa +.

Se han propuesto otras estructuras para los sistemas de control, las cuales no son tratadas en el presente trabajo y algunas de ellas son:

- i) Controlador binario de movimiento para manipuladores.
- ii) Controlador pasivo de movimiento para manipuladores.
- iii) Controlador de estructura variable: método de modos deslizantes.
- iv) Controlador de impedancia mecánica.
- v) Controlador predictivo.

El área de investigación de control de manipuladores es bastante amplia, por lo que para una introducción a su control, solo se analizarán tres controles de posición con el fin de comparar el rendimiento de cada uno de ellos.

3-2.1 CONTROLADORES CON PARÁMETROS FIJOS

Se principiará con el análisis de un control que no usa el modelado dinámico del brazo, y este es el controlador proporcional. Esquema bastante conocido en los sistemas de control lineal, arquitectura sencilla pero poco robusta que resulta en un desempeño pobre. Esquema que usa como argumento principal para su aplicación la razón de su sencillez. Estrategia que considera el sistema manipulador como sistema desacoplado modelando como perturbaciones los efectos producidos por los enlaces no pertenecientes a la unión bajo control. Sistema de control que solo sirve para el control de posición, y no cumple con su objetivo de control para posiciones variantes con el tiempo. Otro nombre con el cual se le conoce es: controlador con realimentación tacométrica. La ley del controlador P, es:

$$T = P\delta - Vv$$

(3-2.1A)

Donde P y V son las matrices de ganancia de posición y velocidad, $P; V \in R^{n \times n}$, estas matrices deben ser diagonales, debido a que se considera que el par que se aplica y el resultante en cada unión, depende de su posición y velocidad, y no de las otras articulaciones. Tal controlador solo depende de p y v , pero no es posible definir la velocidad y aceleración deseada. La siguiente figura muestra la estructura del controlador. Se mostrarán dos ejemplos donde se apreciará el pobre rendimiento de un esquema proporcional para manipuladores.

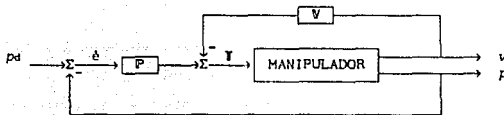


Figura 3.2-1 Estructura del controlador P.

Tómese el modelo lineal simplificado de un motor de C.D.:

$$a + \frac{1}{T}v - \frac{K}{T}V = 0 \quad (3-2.2A)$$

donde V es el voltaje de armadura, τ y k son constantes positivas propias de un motor en particular, y asociadas a su electromecánica.

Tomando (3-2.1A) y haciendo $V = P\dot{e} - Vv$, se llega :

$$a + \tau^{-1}(v) = k\tau^{-1}(P\dot{e} - Vv) \Rightarrow a + \tau^{-1}(1 + \kappa V)v = k\tau^{-1}(P\dot{e})$$

$$\therefore a + \tau^{-1}(1 + \kappa V)v + \tau^{-1}(\kappa Pp) = \tau^{-1}(\kappa Pp_d) \quad (3-2.3A)$$

Si la ganancia estática de la función de transferencia asociada a la E.D. lineal representada por (3-2.3A), es unitaria. Y además si p_d es constante \Rightarrow

$$\lim_{t \rightarrow \infty} p(t) = p_d$$

Simulando el comportamiento del sistema para una posición $p_d = 70^\circ$, se tiene que la posición angular tiende asintóticamente al valor deseado, con lo que se logra p_d , ya que el error final es de aproximadamente 0° , como lo muestran las figuras 3.2-2 y 3.2-3. Haciendo una segunda simulación para p_d variante con el tiempo, se nota el error articular de la p_d y la p , como se muestra en las figuras 3.2-4 y 3.2-5.

El controlador descrito por (3-2.1A) es usado como control de posición, esto implica como restricción principal, que p_d sea constante para modelos lineales de n motores desacoplados de C.D. Un controlador como el anterior carece de robustez, ya que es considerado un motor lineal, y que sus constantes son invariantes, argumentos que no son verdaderos.

CONTROL DEL MANIPULADOR

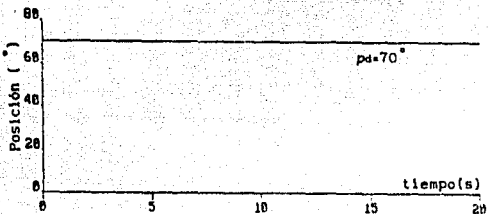


Figura 3.2-2 Evolución de la posición para una entrada invariante.

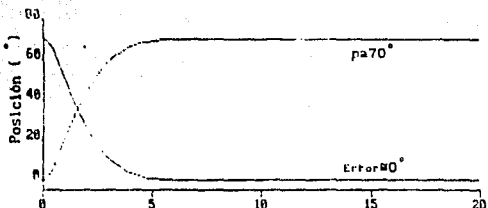


Figura 3.2-3 Evolución del error para una entrada invariante.

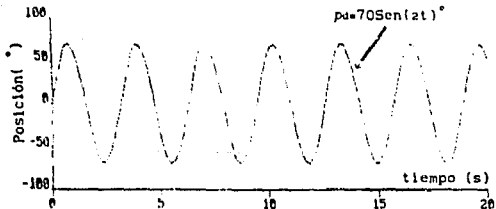


Figura 3.2-4 Evolución de la posición para una entrada variante.

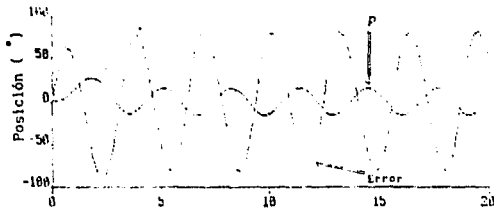


Figura 3.2-5 Evolución del error para una entrada variante.

Otra no-linealidad no considerada en los impulsores con trenes de engranes, es el contragolpe de los dientes debido a la tolerancia de los maquinados, y la imperfección de estos. Debe considerarse también que los motores están sometidos a una serie de acoplamientos entre ellos, los cuales repercuten en perturbaciones torsionantes, debido a los cambios gravitacionales y de inercia dependientes de la posición de cada enlace del manipulador para cada instante.

Entonces se tiene que un controlador proporcional como el expuesto, tiene poca robustez estructural para el control de motores lineales. Ahora mediante el siguiente ejemplo se demostrará analíticamente y con simulaciones la nula robustez del control proporcional cuando se emplea en manipuladores.

Considérese un manipulador de 1 g.d.l. y modélese como un péndulo libre sin fricción. En el péndulo concentrada toda la masa de la estructura que se mueve, tal como se muestra en la figura 3.2-6. El péndulo simple está formado por una masa m , en el extremo de una alambre de masa despreciable y de longitud l , suspendido de un punto fijo p . Considerar que no hay pérdidas por fricción con el aire, y que solo existen dos fuerzas actuando sobre el péndulo, una de estas es la tensión del alambre F_1 , y F_2 debido a la gravedad.

$$\text{de la mecánica elemental: } \sum_{i=0}^n F_i = 0 \quad \therefore \rightarrow$$

$$F_r = -mg \text{Sen}(p)$$

Ahora por la segunda ley de Newton $dt^2 F = m d^2 x$ se tiene \rightarrow que:

$$ml\ddot{\alpha} = -mg \text{Sen}(p) \rightarrow \ddot{\alpha} + g/l [\text{Sen}(p)] = 0 \quad \text{haciendo } l = g \text{ se llega a:}$$

$$\ddot{\alpha} + \text{Sen}(p) = 0 \quad (3-2.4A)$$

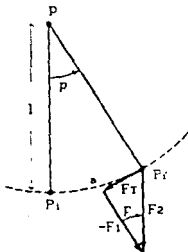


Figura 3.2-6 Diagrama del péndulo libre.

Principiando el estudio analítico, se tiene que la energía potencial del sistema (3-2.4A) es:

$$E_p(p) = - \int_0^p F(p) dp = 1 - \cos(p) \quad (3-2.5A)$$

obteniendo la primera derivada de (3-2.5A) se llega a:

$$\frac{d}{dt} E_p(p) = \frac{\partial E_p}{\partial p} (v) = [\text{Sen}(p)] v$$

$$dE_p(p) = v [\text{Sen}(p)] dt \quad (3-2.6A)$$

Tomando (3-2.6A), e integrando se llega a la expresión siguiente:

$$E_p(p(t)) - E_p(p(0)) = \int_0^t v [\text{Sen}(p) dt] \quad (3-2.7A)$$

Es trivial que la energía potencial es positiva, entonces tomando la relación (3-2.7A) se obtiene:

$$-E_p(p(0)) \leq \int_0^t v [\text{Sen}(p) dt] \leq E_p(p(t))$$

de esta última relación se llega a la expresión siguiente:

$$\int_0^t v [\text{Sen}(p) dt] + E_p(p(0)) \geq 0 \quad (3-2.8A)$$

Usando (3-2.8A), se propone la siguiente función candidata de Lyapunov:

$$C(t, \dot{e}, v) = v^2 + p\dot{e}^2 + \int_0^t v [\text{Sen}(p) dt] + E_p(p(0)) \geq 0 \quad (3-2.9A)$$

Ahora derivando $\zeta(t, \dot{e}, v)$, se obtiene la expresión:

$$\dot{\zeta} = v\dot{e} + P\dot{e}\dot{e} + v\text{Sen}(p)$$

tomando (3-2.4A): $a = T - \text{Sen}(p)$; y $T = P\dot{e} - Vv$ de la ley de control, se llega a: $a = P\dot{e} - Vv - \text{Sen}(p)$, sustituyendo en la expresión anterior \rightarrow

$$\dot{\zeta} = v[P\dot{e} - Vv - \text{Sen}(p)] + P\dot{e}\dot{e} + v\text{Sen}(p), \text{ esto es igual a:}$$

$$\dot{\zeta} = Pv\dot{e} + P\dot{e}\dot{e} - Vv^2 \quad (3-2.10A)$$

Sabiendo que $\dot{e} = p\dot{e} - p$, y si $p\dot{e}$ es constante, $\rightarrow \dot{e} = -v \rightarrow$

$$\dot{\zeta} = -Vv^2 \leq 0 \quad (3-2.11A)$$

Las relaciones (3-2.9A) y (3-2.11A) implican que ζ es una función no-negativa y no-creciente, que garantiza llevar al sistema a su mínima energía potencial.

$$0 \leq \zeta(t, \dot{e}, v) \leq \zeta(t_0, \dot{e}, v), \quad \text{para } 0 \leq t \leq t \quad (3-2.12A)$$

De estas últimas conclusiones y de (3-2.9A), se tiene entonces:

$$v, \dot{e}, \int_0^t v[\text{Sen}(p)]dt \in L_\infty \quad (3-2.13A)$$

Prosiguiendo con el análisis considerar (3-2.11A), e integrando:

$$\zeta(T) - \zeta(0) = \int_0^T -Vv^2 dt \quad \rightarrow \quad \zeta(T) - \zeta(0) = -V \int_0^T v^2 dt = -V |v|_{2,T}^2$$

$$\rightarrow |v|_{2,T}^2 = \frac{\zeta(0) - \zeta(T)}{V} \quad \text{pero } \zeta(0) \leq \zeta(T), \text{ por lo que finalmente}$$

$$|v|_{2,T}^2 \leq \frac{\zeta(0)}{V} \quad \rightarrow \text{por definición } v \in L_2 \quad (3-2.14A)$$

Tomando a de (3-2.4A), con la ley de control (3-2.1A), se tiene:

$$\ddot{a} = P\delta - Vv - \text{Sen}(p) \quad (3-2.15A)$$

considerando (3-2.15A) asegura que $a \in L_\infty$, de (3-2.14A), y por el lema 3.1LP:

$$v \in L_2 \quad a \in L_\infty \rightarrow v(t) \rightarrow 0 \text{ cuando } t \rightarrow \infty$$

Ahora por (3-2.9A), se garantiza que el sistema será llevado a su mínimo estado energético, esto implica que cese el movimiento angular, pero no implica que se alcance la posición deseada. Lo único que garantiza la función de Lyapunov es de que $p(t) \rightarrow \text{constante}$.

Considerando que $\ddot{a} = v\dot{a} = 0$, y que $a(t) \rightarrow 0$ y $v(t) \rightarrow 0$ cuando $t \rightarrow \infty$, se tiene que la relación (3-2.15A) se reduce a:

$$P(p_4 - p) - \text{Sen}(p) = 0 \quad (3-2.16A)$$

La relación (3-2.16A) tiene solución múltiple que depende de los parámetros seleccionados. Por ejemplo, haciendo $P = .1$ y la posición deseada $p_d = 5$, se tiene que la ecuación tiene cinco diferentes soluciones:

- i) $p_1 \approx 00.5$
- ii) $p_2 \approx 03.0$
- iii) $p_3 \approx 06.2$
- iv) $p_4 \approx 10.0$
- v) $p_5 \approx 11.8$

Es claro que ninguna de las soluciones de (3-2.16A), es igual a p_d .

La figura 3.2-7 muestra la evolución de $Pp_d(t)$ y $\text{Sen}(p(t)) + Pp(t)$, donde se aprecia claramente que:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{a}(t) = 0.$$

La figura 3.2-8 muestra la evolución $p(t)$ y $p_d(t)$ usando (3-2.1A) y (3-2.4A), con un valor de 1, para V . Obsérvese que para todas las posiciones iniciales del sistema, el manipulador se desplaza a dos posiciones finales las cuales no son la posición deseada. Aun la $p(0)$ sea la posición deseada, el brazo se desplaza nuevamente a las posiciones finales que son las de mínima energía, no lográndose el objetivo de control. A menos que p_d sea exactamente la posición de energía mínima, y esto no implica controlar. Es claro que el controlador proporcional para estos casos, carece de robustez estructural total. La razón de que no se logre p_d , no se debe a la función de Lyapunov, ya que esta solo garantiza llegar a un mínimo de energía. La responsable de no lograr p_d , es la ley de control, ya que su estructura no considera el modelo dinámico.

CONTROL DEL MANIPULADOR

Es común evitar los errores de un controlador proporcional mediante reducción con trenes de engranes, con lo que (3-2.16A) se expresa como:

$$P_{pd} = R^{-2}[\text{Sen}(p)] + Pp \quad (3-2.17A)$$

Donde R es la relación del engranaje. Lo que se quiere es que cuando $R \gg 1$, teóricamente se logra la desaparición del término senoidal, reduciéndose a:

$$P_{pd} = Pp \quad \Delta \Rightarrow p_d = p \quad \Leftrightarrow R \gg 1 \quad (3-2.18A)$$

La solución de (3-2.17A) es múltiple también, pero esta puede ser aproximada a p_d . Es importante poner cuidado al tomar la medición en las articulaciones, ya el que ruido y la inexactitud de las lecturas en p , pueden conducir a oscilaciones de alta frecuencia. Es importante destacar el pobre desempeño debido a la carencia de robustez de un controlador proporcional, sobre todo si es empleado para intentar controlar manipuladores de transmisión directa.

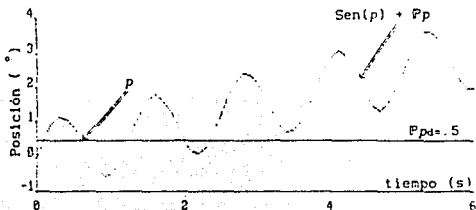


Figura 3.2-7 Evolución de P_{pd} y $\text{Sen}(p) + Pp$.

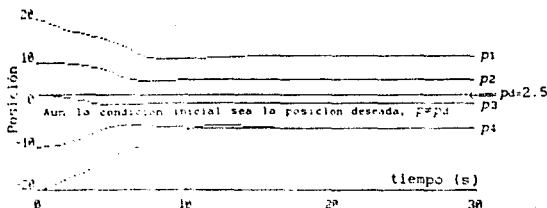


Figura 3.2-8 Evolución de p_d y p , para un controlador proporcional.

3.2-1B CONTROLADOR DE DINÁMICA INVERSA *

Los controladores del tipo de dinámica inversa basan su arquitectura de control de movimiento en base al modelo del manipulador, lo que proporciona cierta robustez estructural. El la ley del controlador de dinámica inversa +, está descrita por la siguiente relación:

$$T = J(p)[\ddot{a} + V\dot{c} + P\dot{c}] + C(p,v)v + G(p) + C(p,v)\phi \quad (3-2.1B)$$

debe notarse que si el término $C(p,v)\phi$ es igual con cero, la ley de control se reduce a un controlador de dinámica inversa.

El vector ϕ de $n \times 1$ se obtiene al filtrar $\dot{c}(t)$ y $\dot{c}^i(t)$:

$$\phi = -\frac{s}{s+\pi}\dot{c} - \frac{1}{s+\pi}[V\dot{c}^i + P\dot{c}] \quad \pi > 0 \quad (3-2.2B)$$

Donde s es el operador diferencial en el tiempo, o parámetro de Laplace para el dominio de la frecuencia, las matrices V y P son matrices simétricas definidas positivas. Es claro que la ley de control (3-2.1B) es basada en el conocimiento de la dinámica del manipulador, del vector ϕ , de la trayectoria deseada: $p_a(t)$, $v_a(t)$, $\ddot{a}_a(t)$, y de la medición de $p(t)$ y $v(t)$.

Por otro lado considerando el filtro ϕ , se obtiene:

$$\dot{\phi} + \pi\phi = -[a\dot{c} + V(v\dot{c} - v) + P(p\dot{c} - p)] \quad (3-2.3B)$$

Usando la relación dinámica del brazo (2-1.22) y la ley de control (3-2.1B), se llega a:

$$J(p)\ddot{a} + C(p,v)v + G(p) = J(p)[\ddot{a} + V\dot{c} + P\dot{c}] + C(p,v)v + G(p) + C(p,v)\phi$$

reduciéndose a:

$$J(p)[\dot{\phi} + \pi\phi] + C(p,v)\phi = 0 \quad (3-2.4B)$$

Considérese ahora la siguiente función candidata de Lyapunov:

$$V(\phi, p) = \frac{1}{2} \phi^T J(p) \phi \geq 0 \quad (3-2.5B)$$

Derivando (3-2.5B) se tiene entonces:

$$\dot{V}(\phi, p) = \frac{1}{2} [2\phi^T \dot{I}(p)\phi + \phi^T \dot{I}(p)\phi] \quad (3-2.6B)$$

Tomando $\dot{I}(p)\phi$ de la relación (3-2.4B), y substituyendo en (3-2.6B):

$$\dot{V}(\phi, p) = -\phi^T \dot{I}(p)\pi\phi - \phi^T C(p, v)\phi + \frac{1}{2} \phi^T \dot{I}(p)\phi \quad (3-2.7B)$$

Considerando la propiedad 3.3MD, y (3-2.7B) se concluye que la relación (3-2.5B) es una función definida positiva y no-creciente.

Usando estas dos últimas conclusiones y del lema 3.2LP se tiene entonces que:

$$\phi \in L^{\infty} \cap L^2 \quad (3-2.8B)$$

Ahora de la relación (3-2.3B):

$$\begin{aligned} (s+\pi)\phi &= -[s^2 I + sV + P]\hat{e} + \\ (ps - p) &= -(s+\pi)[s^2 I + sV + P]^{-1} \phi \end{aligned} \quad (3-2.9B)$$

Ahora por las condiciones previamente establecidas $\pi > 0$, V y P , son matrices simétricas definidas positivas, el miembro del lado derecho de la relación (3-2.9B), define un sistema dinámico lineal multivariable, exponencialmente estable, y estrictamente propio. Es trivial que ϕ es la entrada y $(ps-p)$, su salida. Usando la conclusión (3-2.8B) el lema 3.3LP y corolario 3.1LP:

$$\hat{e}, \dot{\hat{e}} \in L^2 \cap L^{\infty}$$

Concluyéndose que el objetivo de control se alcanza ya que:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (ps(t) - p(t)) = 0 \quad (3-2.10B)$$

3.2-2 CONTROL DE PARÁMETROS ADAPTABLES

En los casos de que el modelo dinámico del manipulador posea cierta incertidumbre en sus parámetros, es necesario usar técnicas de control adaptable, cuando se tiene que los parámetros del modelo son desconocidos, o que su valor es incierto: gravedad, inercia, fuerza centrífuga, tolerancias mecánicas de la estructura. En tales casos la ley de control se fundamenta en un vector de parámetros estimados, el cual es la base para converger a los parámetros del manipulador, nótese que se habla de incertidumbre paramétrica y no de una incertidumbre estructural. Debe destacarse que los parámetros del sistema bajo control son inciertos, pero constantes.

El control adaptable necesita una ley de adaptación, la cual a partir de los parámetros estimados converge a los parámetros reales, cumpliendo con el objetivo de control cuando las constantes del manipulador son inciertas. Usos donde las condiciones de operación cambian: cargas desconocidas. O en lugares donde las matrices paramétricas son estimadas y de ninguna manera son medibles tal como ocurre en aplicaciones de investigación espacial: los manipuladores que han explorado el planeta Marte, la matriz gravitacional se estima, ya que no se conoce exactamente la gravedad marciana y además el punto donde amortiza posiblemente no posea la acción gravitacional calculada, ya que esta depende de la distancia al centro del planeta independientemente de que la carga por levantar es desconocida. Se tiene que en las cadenas manipuladoras submarinas la carga y gravedad se estiman también.

Los controles adaptables se basan en combinar un controlador con algún algoritmo de identificación de parámetros, ya que este permite evaluar las variaciones en la dinámica del proceso, con el fin de modificar y optimizar los parámetros del controlador. Actualmente se tienen dos esquemas generales para los sistemas adaptables: el primero es aquel que usa un modelo de referencia, y lo que se desea es de que el sistema dinámico se comporte de una manera análoga al modelo, el segundo enfoque es aquel denominado regulador auto-sintonizable, donde los parámetros desconocidos son estimados en línea usando un método de estimación recursiva, bajo la consideración de que los parámetros son desconocidos pero constantes. Cuando el proceso es conocido, el proceso de diseño especifica un conjunto deseado de parámetros para el controlador, con lo que el control adaptable converge a esos valores aún cuando el proceso es desconocido. Un regulador con esta propiedad se denomina auto-sintonizable, debido a que el control se sintoniza para lograr el comportamiento deseado.

El controlador de dinámica inversa $+$, es un sistema basado en el conocimiento del modelo dinámico del manipulador, más un filtro multiplicando a la matriz de fuerzas centrífugas y de Coriolis. Tal esquema es excelente y converge a la posición deseada, siempre y cuando los parámetros del modelo sean exactamente iguales a los del manipulador, cuando esto no sucede, seguramente el controlador perderá robustez y no cumplirá su objetivo de control, esto se refiere a que tanto se degrada el controlador cuando los parámetros cambian, y dentro de la teoría de control robusto se evalúa mediante la función llamada función de sensibilidad a cambios de parámetros. En el presente trabajo no se hará ningún estudio de robustez. Ahora la pérdida de robustez conduce a un mal desempeño del controlador, y en casos extremos inestabilidad.

3.2-2C CONTROL ADAPTABLE DE DINÁMICA INVERSA +

Esta es la versión adaptable del controlador previamente visto, con la ley de control siguiente:

$$\tau = \Phi(a_d, v_d, p_d, v, p, \phi) \theta_e \quad \phi \in \mathbb{R}^{n \times n} \quad (3-2.1C)$$

Es claro que si los vectores de la matriz ϕ son acotados la matriz será acotada también, y definida como:

$$I(p)[a_d + \dot{v}_d + P\dot{e}] + C(p, v)v + G(p) - C(p, v)\phi = \phi \theta_e \quad \theta_e \in \mathbb{R}^n \quad (3-2.2C)$$

Por otra parte considérese el vector de parámetros estimados θ_e usado en la ley de control (3-2.1C), este es seleccionado tal que satisfaga la siguiente ley de adaptación del gradiente basada en la regla del MIT:

$$\dot{\theta}_e = -L\phi^T \phi \quad L = L^T > 0 \quad (3-2.3C)$$

Definiendo el vector de errores paramétricos $\theta_{ep} = \theta_e - \theta$, la ley de control (3-2.1C) se expresa por:

$$\tau = \Phi \theta_{ep} + \phi \theta \quad (3-2.4C)$$

Sustituyendo (3-2.4C) en (2-1.22), se obtiene:

$$I(p)a + C(p, v)v + G(p) = \Phi \theta_{ep} + \phi \theta \quad (3-2.5C)$$

Ahora tomando (3-2.5C) y despejando $\phi \theta$ se llega a:

$$\phi \theta = I(p)a + C(p, v)v + G(p) - \Phi \theta_{ep} \quad (3-2.6C)$$

Finalmente igualando (3-2.2C) con (3-2.6C):

$$I(p)[a_d + \dot{v}_d + P\dot{e}] + C(p, v)v + G(p) - C(p, v)\phi = I(p)a + C(p, v)v + G(p) - \Phi \theta_{ep}$$

Mediante manipuleo algebraico se tiene finalmente:

$$I(p)[(a_d - a) + \dot{v}(v_d - v) + P(p_d - p)] - C(p, v)\phi = -\Phi \theta_{ep} \quad (3-2.7C)$$

Tomando (3-2.3B) la relación (3-2.7C) se expresa como:

$$\mathfrak{J}(p) [\dot{\phi} + \pi\phi] + C(p, v)\phi = \dot{\phi}_{\text{esp}} \quad (3-2.8C)$$

Debido a que ϕ es un vector constante, se tiene entonces:

$$\dot{\phi}_{\text{esp}} = \dot{\phi}_0 \quad (3-2.9C)$$

De la relación (3-2.3C) y la (3-2.9C), se llega a:

$$\dot{\phi}_{\text{esp}} = -L\phi^T\phi \quad (3-2.10C)$$

Las relaciones (3-2.8C) y (3-2.10C) son las ecuaciones del modelo del error.

Propóngase la siguiente función no-negativa, y candidata de Lyapunov:

$$V(\phi, p, \phi_{\text{esp}}) = \frac{1}{2} \phi^T \mathfrak{J}(p)\phi + \frac{1}{2} \phi_{\text{esp}}^T L^{-1} \phi_{\text{esp}} \quad (3-2.11C)$$

Ahora obténgase su derivada:

$$\dot{V}(\phi, p, \phi_{\text{esp}}) = \phi^T \dot{\mathfrak{J}}(p)\phi + \frac{1}{2} \phi^T \dot{\mathfrak{J}}(p)\phi + \phi_{\text{esp}}^T L^{-1} \dot{\phi}_{\text{esp}} \quad (3-2.12C)$$

Tomando $\dot{\mathfrak{J}}(p)\phi$ de (3-2.8C) y $\dot{\phi}_{\text{esp}}$ de (3-2.10C), se tiene que \dot{V} es:

$$\dot{V}(\phi, p, \phi_{\text{esp}}) = \phi^T [\dot{\phi}_{\text{esp}} - C(p, v)\phi - \mathfrak{J}(p)\pi\phi] + \frac{1}{2} \phi^T \dot{\mathfrak{J}}(p)\phi + \phi_{\text{esp}}^T L^{-1} (-L\phi^T)\phi$$

Efectuando el producto y considerando que $\phi^T \dot{\phi}_{\text{esp}} = \phi_{\text{esp}}^T \dot{\phi}^T$, se tiene:

$$\dot{V}(\phi, p, \phi_{\text{esp}}) = \phi^T \left[\frac{1}{2} \dot{\mathfrak{J}}(p) - C(p, v) \right] \phi - \pi\phi^T \mathfrak{J}(p)\phi$$

Ahora por la propiedad de antisimetría se llega a:

$$\dot{V} = -\pi\phi^T \mathfrak{J}(p)\phi \quad (3-2.13C)$$

De (3-2.11C), (3-2.13C) y el lema 3.2LP se concluye que ϕ es acotada esto es:

$$\phi \in L^\infty \cap L^0 \quad (3-2.14C)$$

Tomando (3-2.9B), se sabe que representa un sistema dinámico, multivariable,

lineal, exponencialmente estable, y estrictamente propio, con entrada ϕ , y salida δ . Empleando el lema 3.3LP y el corolario 3.1LP se tiene:

$$\delta, \dot{\delta} \in L^2 \cap L^{\infty} \quad (3-2.15C)$$

Esto implica que el vector δ , es acotado y no creciente:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \delta(t) = 0$$

Por otra parte si ad , $v\delta$ y $p\delta$ son acotados se tiene:

$$p, v \in L^{\infty} \quad (3-2.16C)$$

De (3-2.14C), y (3-2.16C) se tiene que ϕ es acotada.

Considerando (3-2.7C) y despejando a :

$$a = S(p)^{-1} [\phi \dot{\phi} - C(p, v)\phi] + V\dot{\delta} + P\delta + ad \quad (3-2.17C)$$

Ahora como todos los elementos del lado derecho de (3-2.17C) son acotados, se tiene entonces que:

$$a, (ad - a) \in L^{\infty} \quad (3-2.18C)$$

De (3-2.15C) y el lema 3.1LP se concluye que:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\delta} = 0 \quad (3-2.19C)$$

3.3 CONTROL HÍBRIDO

En aplicaciones donde el manipulador debe interactuar con el medio ambiente, es necesario controlar su fuerza para lograr su tarea. En estas aplicaciones es necesario dotar al manipulador de un control de posición-fuerza, con lo que se llega finalmente a un control híbrido.

Debe mencionarse que los controladores de fuerza son un área de amplia investigación actualmente, por lo que solamente se presentará la idea de lo que es un controlador de posición-fuerza.

Para implementarse una arquitectura híbrida, es necesario diseñar leyes de posición y fuerza para cada uno de los grados de libertad, e implementar el sistema de control total mediante las llamadas matrices de selección. La matriz de selección S , es una matriz diagonal con elementos igual a uno en las entradas diagonales correspondientes a los grados de libertad en el marco de compliancia, que son la posición a ser controlada. $I-S$, es de naturaleza diagonal con elementos igual a uno en las entradas diagonales correspondientes

a los grados de libertad y que son la fuerza a ser controlada. De esta manera cada grado de libertad es especificado solamente como posición a controlar o fuerza a controlar. En la figura 3.3-1 se muestra la arquitectura de un controlador híbrido.

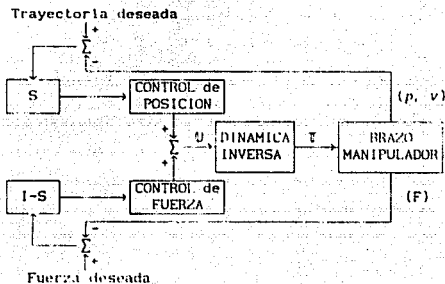


Figura 3.3-1 Arquitectura de un controlador híbrido.

3-4 CONTROL PARA UNA CADENA CON DOS G.D.L.

En esta sección se presentará el diseño de un sistema de control adaptable, para un brazo planar con dos g.d.l.

Considérese el modelo dinámico dado por la relación matricial siguiente:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= c_1 \dot{a}_1 + (c_3 C_{21} + c_4 S_{21}) \dot{a}_2 - c_3 S_{12} v_2 + c_4 C_{12} v_2 \\ \tau_2 &= (c_3 C_{21} + c_4 S_{21}) \dot{a}_1 + c_2 \dot{a}_2 + c_3 S_{21} v_1 - c_4 C_{21} v_1 \end{aligned} \quad (3-4.1)$$

Donde $C_{21} = \cos(p_2 - p_1)$, y $S_{21} = \sin(p_2 - p_1)$. Y los parámetros inciertos c_i , dependen de la masa y longitud de los enlaces, carga por levantar y constantes desconocidas. Identificando cada uno de los elementos de la relación (3-4.1), esta es llevada a la forma dada por (3-4.2):

$$\begin{bmatrix} c_1 & c_3 C_{21} + c_4 S_{21} \\ c_3 C_{21} + c_4 S_{21} & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{a}_1 \\ \dot{a}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -c_3 S_{12} v_2 \\ c_3 S_{21} v_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \tau \quad (3-4.2)$$

Tomando la ley de control dada por (3-2.1C), puede expresarse como:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \phi_{11}e_{e1} + \phi_{12}e_{e2} + \phi_{13}e_{e3} + \phi_{14}e_{e4} \\ \tau_2 &= \phi_{21}e_{e1} + \phi_{22}e_{e2} + \phi_{23}e_{e3} + \phi_{24}e_{e4} \end{aligned} \quad (3-4.3)$$

Considerando las relaciones (3-2.2C) y (3-4.1), se tiene que:

$$\begin{aligned} \phi_{11} &= \psi_{11} & \phi_{12} &= 0 & \phi_{13} &= C_{21}\psi_{12} - S_{21}v_2\psi_{22} & \phi_{14} &= S_{12}\psi_{12} + C_{21}v_2\psi_{22} \\ \phi_{21} &= 0 & \phi_{22} &= \psi_{22} & \phi_{23} &= C_{21}\psi_{11} - S_{21}v_1\psi_{21} & \phi_{24} &= S_{21}\psi_{11} - C_{21}v_1\psi_{21} \end{aligned}$$

donde:

$$\begin{aligned} \psi_{11} &= ad_1 + V_1(v_{d1} - v_1) + P_1(p_{d1} - p_1) \\ \psi_{12} &= ad_2 + V_2(v_{d2} - v_2) + P_2(p_{d2} - p_2) \\ \psi_{21} &= v_1 - \phi_1 \\ \psi_{22} &= v_2 - \phi_2 \end{aligned}$$

Y por conveniencia, las matrices V y P se proponen diagonales:

$$V = \text{diag}[50 \quad 70]; \quad P = \text{diag}[500 \quad 900]$$

Supóngase que el manipulador pertenece a un explorador espacial, y que los parámetros θ_i , son desconocidos. Propóngase el siguiente vector paramétrico inicial: $[-0.1, 0.7, -1.0, 1.0]^T$. Para la ley de adaptación (3-2.3C), se propone a: $\lambda = \text{diag}[0.3]$. Por lo que ésta ley puede escribirse como:

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_{e1} &= -\lambda\phi_{11}\phi_1 & ; \theta_{e1}(0) &= -0.1 \\ \dot{\theta}_{e2} &= -\lambda\phi_{22}\phi_2 & ; \theta_{e2}(0) &= 0.7 \\ \dot{\theta}_{e3} &= -\lambda(\phi_{13}\phi_1 + \phi_{23}\phi_2) & ; \theta_{e3}(0) &= -1.0 \\ \dot{\theta}_{e4} &= -\lambda(\phi_{14}\phi_1 + \phi_{24}\phi_2) & ; \theta_{e4}(0) &= 1.0 \end{aligned}$$

El desempeño del control de movimiento para las dos articulaciones, aparece en la figura (3.4-1). La figura (3.4-2) muestra los errores de posición y velocidad. En (3.4-3) aparece la evolución de los torques aplicados a cada una de las articulaciones. Finalmente (3.4-4) muestra la evolución del vector paramétrico. Es claro que partiendo de valores $\theta_i(0) \neq \theta_i(t)$, se converge a los parámetros propios del manipulador.

Del análisis de las evoluciones de los estados modificados por la acción del controlador, se concluye:

- I) Se logra el objetivo de control de posición de p_1, p_2 , a partir de las velocidades iniciales v_{1i} y v_{2i} .
- II) Se logra la identificación de parámetros, lo cual conduce a la adaptación del control. Ya que desconociendo el vector paramétrico, y a partir de

CONTROL DEL MANIPULADOR

un conjunto de valores arbitrarios propuestos, la ley de adaptación converge a los valores asociados a la dinámica del brazo.

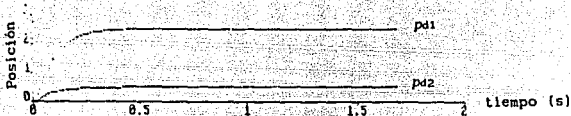


Figura (3.4-1) Evolución de p_1 y p_2 .

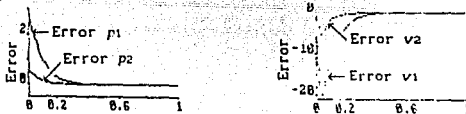


Figura (3.4-2) Evolución de los errores de posición y velocidad.

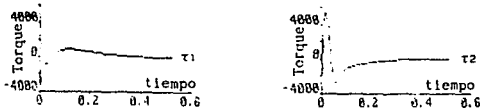


Figura (3.4-3) Evolución de los torques en las articulaciones.

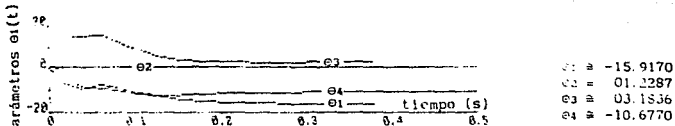


Figura (3.4-4) Evolución del vector paramétrico.

Vector paramétrico.

Finalmente la acción de control e identificación de parámetros, se tiene bajo la restricción de que para representar el comportamiento dinámico del brazo, se tiene incertidumbre paramétrica, y no incertidumbre estructural

4-1 CARACTERÍSTICAS DE LENGUAJES A NIVEL DE MANIPULADOR

La forma más sencilla para diseñar un lenguaje a de manipulador, es en base a un lenguaje de alto nivel existente, el cual cumpla con los requerimientos de programación para el manipulador. Los pasos a seguir cuando se programan tales sistemas son los siguientes:

- i) Definir el espacio de trabajo limitado por las estructuras que rodean al sistema, posiciones singulares y casos degenerados.
- ii) Proporcionar la posición y orientación de los objetos a manipular.
- iii) Descomponer en diferentes pasos la tarea total a realizar.
- iv) Colocar los sensores adecuados en la posición necesaria, para detectar fallas o situaciones anormales durante el funcionamiento del sistema.
- v) Finalmente comprobar que las tareas de trabajo sean logradas con las consideraciones anteriores, de no ser así, corregir lo necesario.

4-1.1 ESPECIFICACIÓN DE LA POSICIÓN

En aplicaciones de armado, es claro que todas las partes a manipular deben estar dentro del espacio de trabajo, y esto implica que el volumen de trabajo debe estar bien definido. La posición se define claramente mediante el vector de la geometría de posición-orientación.

4-1.2 ESPECIFICACIÓN DEL MOVIMIENTO

La primer aplicación de manipuladores es la de toma y coloca, que consiste de una posición inicial y una posición final, donde en alguna de ellas se toma un objeto y en la otra es depositado. Ahora si no se tuviesen las restricciones del espacio de trabajo, caso singular y degenerado, las tareas del brazo se harían con facilidad especificando solamente la posición inicial y final. Las restricciones conducen a la planeación de la trayectoria, para evitar las posiciones no logrables y colisiones con el medio que le rodea. La posición y la orientación desadas, pueden definirse mediante el espacio de variables de articulación, o el espacio cartesiano, dependiendo del lenguaje empleado.

4-1.3 PROGRAMACIÓN AUXILIADA CON SENSORES

En los primeros manipuladores el sistema de control se basaba en apagadores y levas, posteriormente los controladores realizaban su secuencia de movimiento grabada en sistemas magnéticos. Los primeros sistemas para controlar brazos tuvieron la restricción de que el sistema no era capaz de tomar decisiones acerca de lo bien o mal llevado que estaba su trabajo. Actualmente los controladores digitales como los expuestos en la sección de control, pueden auxiliarse con diferentes sensores para indicarle cuando existen anomalías en la tarea que se está realizando, ya que no solo es importante el control de posición, sino también combinar al controlador con la información de lo que está ocurriendo a su alrededor, para que el sistema pueda decidir en los casos de operación anormal, entre detener el movimiento, o cambiar la trayectoria.

Los sensores básicos empleados actualmente son:

- 1) Sensores de posición.
- ii) Sensores de tacto y fuerza.
- iii) Sistemas de visión.

4-1.4 ADECUADO SISTEMA DE PROGRAMACIÓN

Cualquier lenguaje de programación de alto nivel es inútil, sino tiene editor depurador, ensamblador, interpretador o compilador. Los programas grandes y complejos son difíciles de implementar y depurar sin un ambiente de programación adecuado. Además la programación en manipuladores impone requerimientos adicionales durante su implementación y depuración:

- i) Modificación en línea y funcionamiento inmediato, cuando la tarea del manipulador es compleja, sus movimientos también lo son. Esto exige grandes tiempos de ejecución, y no siempre es posible reiniciar el programa después de una falla ocurrida en cualquier parte de la tarea que se está ejecutando. En estos casos, se necesita que el sistema de programación pueda modificarse en línea, y tener la facilidad de ser reinicializado en cualquier etapa del proceso.
- ii) Medición de los sensores solo en caso de funcionamiento anormal, en los procesos complejos no siempre es posible estar tomando lecturas de los sensores y controlar en tiempo real. El sistema de programación debe ser capaz de guardar el intervalo de lecturas de los sensores en operación normal, para que en caso de falla o detención del sistema, se tomen lecturas nuevas, se comparen con los valores nominales, e indique la falla o tome decisiones para resolver un mal funcionamiento.
- iii) Simulación, un sistema de programación complementado con archivos de simulación simplifica bastante la programación, ya que la simulación es un buen auxiliar para seleccionar la mejor trayectoria, ya sea para evitar obstáculos, gastar el menor tiempo en la operación, y en el caso más general para obtener el mejor desempeño de todo el sistema.

Es importante notar que programar mediante lenguajes de programación a nivel del manipulador, son tediosos, difíciles y no es tan fácil optimizarlos.

4-2 CARACTERÍSTICAS DE LENGUAJES A NIVEL DE TAREAS DE TRABAJO

Un segundo enfoque para programar manipuladores, es a nivel de tareas de trabajo donde la tarea a realizar es descrita en términos de los objetos a ser manipulados, y no en base al movimiento del manipulador. Un sistema enfocado en base a las tareas por realizar, simplifica bastante su programación.

Los sistemas basados en las tareas de trabajo se diseñan en dos partes, la primera es que mediante lenguajes de alto nivel el usuario describe la tarea a realizarse. En segundo término se tiene la planeación de tarea, fundamentada en la base de datos que modelan el entorno de trabajo. Una vez obtenidas las dos partes que describen el comportamiento deseado del manipulador dentro de su espacio de trabajo, el planeador de tareas elaborará el programa más adecuado para esa aplicación.

4-2.1 MODELADO DEL ESPACIO DE TRABAJO

Para que el planeador de tareas pueda programar el sistema, debe tener todos los datos del brazo y objetos que le rodean, donde se tienen dos enfoques.

4-2.1A MODELADO GEOMÉTRICO

El modelado geométrico proporciona la información espacial: volumen, forma, y dimensión de los objetos dentro del espacio de trabajo. Este se fundamenta en formas geométricas básicas, donde los objetos se definen mediante la combinación de estas formas y operaciones de la teoría de conjuntos.

Las formas básicas pueden representarse con:

- i) Un conjunto de puntos y orillas.
- ii) Un conjunto de superficies.
- iii) Cilindros generalizados.
- iv) Descomposición de celdas

4-2.1B MODELADO FÍSICO

Este se fundamenta en la representación de los objetos en su espacio de trabajo al cual se le asigna un marco a cada uno de ellos, y su localización es mediante este marco. Todos los objetos del espacio de trabajo están relacionados mediante alguna de las siguientes características:

- i) Fijación, un objeto puede estar rígidamente, no-rígidamente, o fijo condicionalmente a otro objeto.
- ii) Restricción, las relaciones de restricción representan las restricciones físicas entre objetos los cuales pueden ser girados o trasladados.
- iii) Componente de armado, se usa para indicar que es una parte del objeto por armarse y que puede ser referenciado como un objeto.

4-2.2 ESPECIFICACIÓN DE TAREAS

Una tarea de ensamble puede describirse como una sucesión de movimientos en el espacio de trabajo, los cuales dependen de la relación existente entre los objetos. Esta especificación de movimientos no especifica totalmente la operación por realizarse, por ejemplo este enfoque proporciona todos los movimientos para tomar, posicionar y orientar un tornillo, pero no es posible especificar el torque necesario para apretarlo. En tales casos no basta con proporcionar la serie de movimientos a realizar por el manipulador. Por lo que los sistemas de programación añaden comandos para completar la información:

- i) Descripción de movimiento, dicta la serie de movimientos necesarios para alcanzar cierta posición y orientación.
- ii) Descripción de herramienta, especifica el tipo de herramienta por usar.
- iii) Descripción de apriete, es la forma en que se efectuará el apriete de la pieza por armar: sentido de la rosca y torque.

CAPITULO CINCO: TRANSDUCTORES Y PERCEPTORES NO VISUALES

5-1 TRANSDUCTORES DE TACTO, ESFUERZO Y PROXIMIDAD

Un manipulador para lograr satisfactoriamente su tarea de trabajo debe tener información de lo que ocurre a su alrededor, esto se logra mediante sensores o transductores que informan el contacto, la fuerza aplicada, la proximidad de las piezas a manipular, o de obstáculos presentes en el espacio de trabajo.

5-1.1 TRANSDUCTORES DE TACTO

Los transductores de tacto se caracterizan por la detección del contacto físico del manipulador con algún objeto, y haciendo un isomorfismo del fenómeno con una señal eléctrica. Se tienen dos tipos de sensores, uno que es de naturaleza binaria, empleado directamente en los sistemas de cómputo, y un segundo de naturaleza analógica, que requiere digitalizarse para ser usado.

Los sensores de naturaleza binaria solo detectan la ocurrencia del contacto físico, sin poder conocer la fuerza aplicada. Esto se refiere a que el sensor tiene una de los posibles respuestas: sí o no. El detector más sencillo y más usado, es aquel que posee un interruptor, ahora si varios interruptores son combinados en un mismo sistema, es posible tener un sensor táctil.

5-1.2 TRANSDUCTORES DE ESFUERZO

Mediante un transductor de naturaleza analógica, es posible obtener ahora un sensor de fuerza, donde la respuesta del transductor es proporcional a la fuerza aplicada al objeto o pieza por manipularse. La idea básica de un sensor de este tipo, es fundamentada en el uso de la parte elástica de los materiales, donde la deformación es proporcional a la fuerza aplicada al sensor, ahora haciendo un segundo isomorfismo, la deformación es proporcional a la señal de salida de un dispositivo eléctrico. Una vez que la señal eléctrica se obtiene, es posible ahora obtener su equivalente digital y usarse en el sistema de cómputo. Es posible mediante un sensor de naturaleza analógica obtener no solo la fuerza aplicada, sino que también la dirección de la fuerza, esto es sencillo: por ejemplo teniendo una lectura normalizada en el sensor, si esta se incrementa el movimiento es en un sentido, por otro lado si la lectura decrece, es claro que la fuerza disminuye, y esto implica que el movimiento es en sentido contrario.

Otra aplicación de la naturaleza elástica de los materiales, es en los sensores de fuerza y torsión, los cuales son usados comúnmente en la muñeca del porta-herramientas y en las articulaciones. La figura 5.1-1 muestra la arquitectura básica del sensor de muñeca empleado para el control de fuerza aplicada a la pieza durante la manipulación.

En la sección de control se habló de las matrices del marco de compliancia asociadas a los sensores de fuerza, y de las matrices de selección. En base a la figura 5.1-1, se obtiene la matriz que describe el comportamiento de los sensores de muñeca, cuando se emplean en controladores de posición-fuerza.

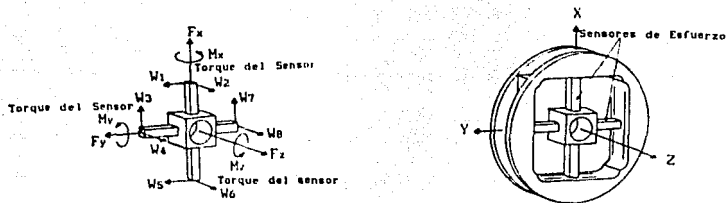


Figura 5.1-1 Sensor de fuerza y torque de muñeca.

Los sensores de fuerza o esfuerzo industriales, poseen la arquitectura mostrada en la figura 5.1-1. Los sensores de muñeca típicos son pequeños, ligeros, y compactos, generalmente fabricados de aluminio fundido. Nuevamente en este tipo de transductores se hace un isomorfismo entre la fuerza aplicada, los momentos torsionantes, la deformación del metal y una señal eléctrica.

Es claro que para obtener lecturas confiables, este transductor debe poseer las siguientes características:

- 1) Linealidad, el sensor debe ser usado en la porción elástica de su curva de esfuerzo-deformación, para garantizar que la deformación sea proporcional a la fuerza o pares torsionantes, y como consecuencia la señal eléctrica proporcione información confiable de las fuerzas actuantes en la muñeca. El transductor mecánico-eléctrico debe poseer una buena linealidad entre la lectura mecánica y la salida eléctrica.
- ii) Baja histéresis y fricción interna, la fricción interna del sensor reduce su sensibilidad debido a que para que se detecte la deformación de alguno de los elementos del transductor, es necesario vencer su fricción interna. En segundo término, un elemento que almacena energía al suspender la excitación, produce el efecto de histéresis.
- iii) Diseño compacto, esto es necesario para no restringir el movimiento del manipulador, y ubicar el sensor lo más cerca del porta-herramientas.
- iv) Alta rigidez, la frecuencia natural de un elemento mecánico depende principalmente de su rigidez, por lo que empleando un sensor con material suficientemente rígido, es posible amortiguar rápidamente las perturbaciones.

Actualmente se investiga el desarrollo de una piel artificial, básicamente se tienen dos enfoques: el primero es aquel formado por una malla de conductores y separados por un aislante formando un emparedado. Ahora los puntos donde los conductores se cruzan, son localizados mediante un sistema cartesiano. En la segunda propuesta el cruce de conductores es substituido por capacitores, con lo cual no solo se ubica el punto de contacto, sino la fuerza también.

5-1.3 TRANSDUCTORES DE PROXIMIDAD

Todos los transductores vistos anteriormente poseen la característica de que solo detectan fenómenos basados en el contacto físico del sensor. Se tienen otras aplicaciones donde es necesario conocer la distancia o la presencia del obstáculo, o la pieza a manipular sin tener ningún contacto físico, con el fin de ejercer los ajustes pertinentes y alcanzar un objetivo en particular. Para aplicaciones donde se desean prevenir los efectos de una colisión, o ajustar el mecanismo de control del manipulador, se emplean sistemas detectores de proximidad, los cuales son basados en efectos físicos que son isomorfos a la distancia por conocer.

5-1.3A SENSORES CAPACITIVOS, INDUCTIVOS, Y MAGNÉTICOS

Los sensores de proximidad más sencillos son aquellos basados en los efectos capacitivos e inductivos, un sistema un poco más complejo es basado en el efecto Hall.

- 1) Sensores capacitivos, los sensores basados en la capacitancia pueden detectar a distancias cortas prácticamente cualquier tipo de material, fundamentalmente la detección de objetos se basa en el cambio de capacitancia inducida debido a la proximidad de alguna superficie cercana al elemento sensor. Está formado básicamente por un electrodó de referencia y el electrodó sensitivo. El sistema más común es aquél formado por un oscilador, donde el sensor es elemento capacitivo del circuito tanque, y el sistema empieza a oscilar cuando la cercanía de una superficie altera la capacitancia y pone el sistema en resonancia. El fenómeno de resonancia debido a la cercanía de alguna superficie, es entonces ahora convertido en una salida eléctrica para indicar la presencia de algún objeto o superficie. Es importante notar que un sensor de este tipo entrega una respuesta binaria, y que no es posible conocer exactamente la distancia entre la superficie y el sensor, lo único que se puede asegurar es que el obstáculo está dentro del rango de distancia que puede sentir el sistema capacitivo.
- 11) Sensores inductivos, estos se basan en el voltaje inducido en una bobina debido a la presencia de materiales metálicos. El principio básico es mediante un inductor devanado cerca de un imán permanente, y ambos protegidos por una cubierta. Ahora el aproximar un material ferromagnético al sensor, altera las líneas de flujo en el imán, esta alteración de líneas del flujo magnético inducen una diferencia de potencial en el devanado, cuya amplitud y forma dependen de la velocidad de cambio del flujo magnético. La forma del voltaje inducido en la bobina puede informar la velocidad, la dirección y la distancia del objeto detectado mediante un sensor con fundamento en la inductancia. Es común que solo se usen salidas binarias al emplear sistemas con nivel de transición, ya que solo es posible detectar materiales ferromagnéticos a distancias relativamente cortas, y en la gran mayoría de los sistemas solo es importante la detección de objetos dentro de un rango de distancia limitado.
- 111) Sensores magnéticos, este se basa en el efecto Hall para detectar objetos ferromagnéticos mediante un imán permanente. El efecto Hall es la relación del voltaje entre dos puntos de un material conductor, y el

campo magnético a través del material mismo. El sensor magnético usa un imán de herradura, y en el centro de las líneas de flujo magnético que son conocidas, se coloca un sensor de efecto Hall, ahora si es aproximado un material ferromagnético cerca del imán permanente, una parte de las líneas del campo magnético atravesarán el material, y como consecuencia las líneas que pasaban a través del sensor Hall, se verán reducidas, con lo cual claramente se detecta la proximidad de cualquier material metálico, con propiedades ferromagnéticas.

5-1.3B SENSORES BASADOS EN LA PROPAGACIÓN ESPACIAL DE ONDAS

En este tipo de sensores no solo se detecta la proximidad de los objetos, sino que también es posible detectar la distancia, posición, y su forma. Y en el caso de objetos que se desplazan, su dirección y sentido. Fundamentalmente usa el principio de la detección de objetos usado por los murciélagos, y que a su vez es la base del radar y el sonar. Existen actualmente sensores basados en la propagación de ondas ultrasónicas, ondas luminosas, y los equipos más refinados pueden usar haces luminosos concentrados: laser.

El principio del cual se parte es el siguiente: mediante un transmisor son emitidas señales en forma de pulsos, estos pulsos viajan a través del espacio, después de cierto intervalo de tiempo, se activa un receptor de la misma frecuencia que el transmisor; si el receptor detecta que alguno de los pulsos emitidos es regresado, esto implica que encontró un obstáculo en su camino.

Ahora la distancia a la cual se encuentra el objeto es calculada en base a la velocidad de propagación de la señal transmitida. La forma de conocer si el objeto se acerca o se aleja es mediante alteraciones en el tiempo transcurrido entre la transmisión y recepción de un primer pulso, y el tiempo empleado por los subsecuentes pulsos para el mismo objeto. Esta información es útil para conocer la velocidad del obstáculo, aunque es posible lograr el mismo resultado mediante el efecto Doppler.

5-2 MÁQUINAS PARLANTES Y ORDENADAS POR VOZ

Se presentarán dos métodos para que un sistema hable: digitalización directa de la señal de audio, y síntesis de voz mediante fonemas.

5-2.1 MÉTODO POR DIGITALIZACIÓN DE VOZ

La digitalización de voz se refiere a que teniendo una señal de audio de carácter analógico, esta es muestreada a una velocidad apropiada de acuerdo a la frecuencia máxima por digitalizar: por ejemplo si la velocidad de muestreo se fundamenta en el criterio de Nyquist para evitar el aliasing, es necesario muestrear al menos el doble de la frecuencia máxima a digitalizar, causando el almacenaje de una gran cantidad de datos digitales; supóngase que se desea digitalizar una señal de 3 KHz, entonces se deben tomar 6000 muestras/seg, y si por ejemplo son seleccionados CA/D de 8 bits, es necesario almacenar 6 Kb por segundo.

Una vez que la señal analógica es muestreada, se almacena en sistemas no volátiles para posteriormente reproducirla mediante la operación inversa: se tiene el equivalente digital para cada muestra analógica, ahora mediante un CD/A, se obtiene su equivalente analógico para cada instante, con lo cual se reproduce la señal sonora original.

En sistemas para manipuladores no es conveniente una estrategia de este tipo, ya que realmente no es tan importante la fidelidad de la voz o mensaje dado por el sistema parlante. Para sistemas de alta fidelidad en audio y para gran almacenaje de datos, se emplean los discos compactos, o CD ROM como se les conoce actualmente. Para simplificar y agilizar los sistemas digitales que hablan, se usa preferentemente el método conocido como fonemas, el cual se basa en tener sonidos básicos llamados fonemas, y la secuenciación apropiada de cada uno de estos.

5-2.2 SÍNTESIS DE VOZ MEDIANTE FONEMAS

El método de fonemas basa la síntesis de voz en la modificación de la forma de onda, y no tanto en obtener el equivalente digital de la señal analógica.

La voz humana está formada por dos sonidos básicos: aquél producido por la vibración de las cuerdas vocales de frecuencia constante, y que es modificado por la posición de la lengua, la forma de la boca, y posición de los labios, un sonido de este tipo es el de la vocal E. Se tiene un segundo sonido que es producido por un flujo constante de aire procedente de los pulmones, y que es modificado por la posición y forma de la lengua: el sonido de la letra S, es un claro ejemplo. Finalmente se tienen sonidos nasales que son la combinación de los dos anteriores.

Es posible hacer un isomorfismo de la voz humana con un sistema electrónico formado por un generador de tonos de frecuencia variable, que representa a los sonidos de las cuerdas vocales. Los sonidos debido al aire de los pulmones, pueden obtenerse mediante un generador de ruido blanco. Ahora combinando los dos sonidos básicos, y modificando su salida usando filtros resonantes, es posible modificar la suma de los dos generadores para lograr el sonido deseado. Los filtros empleados se les conoce también como filtros formantes, ya que modifican la señal de salida y además son programables. En la figura 5.2-1 muestra el modelo electrónico para la generación de voz humana.

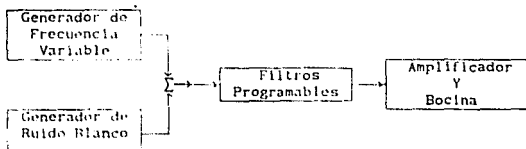


Figura 5.2-1 Modelo Electrónico de la voz Humana.

Los tres principales métodos para implementar el modelo electrónico de la voz humana son:

- i) Codificación lineal predictiva.
- ii) Filtros resonantes o Filtros formantes.
- iii) Fonemas.

Los tres métodos difieren principalmente en el tipo de filtro usado, y como las características de los filtros son modificadas. Este trabajo se limitará a los sistemas de fonemas, donde se tienen dos enfoques principales:

- 1) Usando un programa de computadora que mediante tonos genera los fonemas básicos, y posteriormente mediante su correcta selección y secuenciación se logra el mensaje requerido.
- ii) Otra forma es mediante sistemas diseñados especialmente para la síntesis de voz, los cuales son sistemas de lógica alambrada, con memorias que tienen los fonemas preparados por el fabricante para un determinado idioma. En la gran mayoría de los sistemas es posible que el usuario genere su propio banco de fonemas para su aplicación o gusto personal.

5-2.2A FONEMAS MEDIANTE PROGRAMA DE COMPUTADORA

Los métodos para síntesis de voz empleados en las computadoras, usan la lectura de un texto en ASCII, y traducen cada letra o conjunto de letras en su equivalente fonético, reproduciendo el mensaje a través de la bocina de la computadora.

En base a las reglas de texto-voz de un trabajo presentado en 1976, se hacen la gran mayoría de los programas que sintetizan mensajes hablados, usando los lineamientos mostrados en:

"Letter-to-Sound Rules for Automatic Translation of English Text to Phonetics"

Elovitz, H.S., Johnson, R., McHugh, A., and Shore, J.E., (1976)
 IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing,
 Vol. ASSP-24(6), 446-458.

Implementando las reglas anteriores y usando programación en Pascal, Basic, o C, se edita un archivo que codifica cada fonema como una sucesión de bits que controlan la generación de tonos en el parlante.

5-2.2B FONEMAS MEDIANTE LÓGICA ALAMBRADA

Actualmente se tienen diferentes sistemas que producen la síntesis de voz, pero los más conocidos son el DigiTalker y el sistema Votrax. Un estudio de tales sistemas está fuera de los objetivos del presente trabajo. Por lo que en las referencias se indican las publicaciones de consulta.

5-2.3 MÁQUINAS ORDENADAS POR VOZ

El término de máquinas ordenadas por voz, se refiere a que un manipulador y en general cualquier sistema, actúe y responda mediante órdenes o comandos hablados por el usuario. El reconocimiento de la voz no es un asunto trivial, y es más complejo que la síntesis de voz, el proceso es similar a reconocer objetos en los sistemas de visión por computadora. En los comandos hablados se hacen escantillones para cada instrucción que deba reconocer el sistema y se almacenan en memoria, para que posteriormente al dar una instrucción esta sea comparada con las que tiene en el banco de datos y pueda realizarla.

La forma de obtener cada escantillón es entrenando al sistema para producir un escantillón por cada palabra: el usuario pronuncia la palabra varias veces frente al microfono del sistema. Ahora mediante un algoritmo apropiado se determinan los parámetros o características más importantes de cada una de las repeticiones, se les promedia, y elimina información redundante para obtener el escantillón que representa a esa palabra. En la figura 5.2-2 se muestra un sistema básico para obtener los escantillones, tal sistema usa nuevamente filtros formantes, con la frecuencia central ajustada al tono de voz de quién lo entrena, y es deseable que la persona que lo entrena, sea el usuario que dará las instrucciones durante la operación del sistema. El tren de pulsos del detector de cruce por cero, proporciona información de la frecuencia de la señal de voz, y esta señal de frecuencia se convierte a voltaje para digitalizarse al igual que la salida de los filtros formantes.

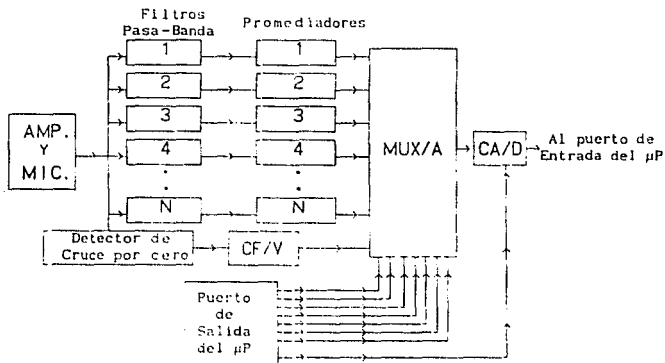


Figura 5.2-2 Diagrama de un Sistema para Reconocimiento de Voz.

CAPITULO SEIS: PERCEPCION DE IMAGENES EN LAS MAQUINAS

6-1 TRANSDUCTORES PARA DIGITALIZACIÓN DE IMÁGENES

Observando a nuestro alrededor nos daremos cuenta de lo maravilloso que es nuestro sistema de visión, este nos informa de una enorme cantidad de datos en fracciones de segundo pero nunca reflexionamos lo grandioso y complejo que es.

La búsqueda de sistemas perceptores evolucionados semejantes al humano, es la meta de todo investigador que se dedique a esta rama de la inteligencia artificial. Debido a la velocidad de la luz, y a los grandes volúmenes de memoria necesarios para formar una imagen digital, no es posible actualmente hacer un receptor visual semejante al nuestro, ya que para formar un buffer de cuadros con una imagen aceptable, es preciso tener miles de bytes si no es que millones, solo para obtener una imagen estática y limitada a dos dimensiones. Para en cierto modo salvar tales obstáculos, se han propuesto estrategias y algoritmos de percepción con el fin de ahorrar datos que guardar y así acelerar el proceso de comparación de los escantillones, y mediante imágenes relativamente sencillas el autómeta extraiga los datos principales para lograr su tarea de trabajo, ya que después de todo un autómeta no está obligado a tener sentidos humanos. Mucha investigación se ha desarrollado en ideas y algoritmos para acelerar el proceso de cuadros y almacenar pocos datos digitales, pero existen estrategias que son ampliamente usadas para obtener los escantillones:

- i) Análisis regional.
- ii) Detección de aristas.
- iii) Iluminación especial.
- iv) Análisis de imágenes múltiples: estéreo y movimiento.
- v) Textura.
- vi) Sombreado.
- vii) Color.
- viii) Percepción ultrasónica.

De las cuales solo se contemplan las dos primeras en este trabajo.

Otro tópico de importancia son las imágenes digitalizadas con animación. En la actualidad para estos sistemas no existe aplicación en cibernética debido a la gran cantidad de memoria requerida para cada buffer de cuadros, y el hardware que esto implica. Los sistemas animados son utilizados en la cinematografía: TRON, y STAR WARS, fueron animados digitalmente.

Una imagen que se digitaliza se procesa, y cuando se logra el escantillón óptimo para la aplicación requerida, este se almacena. Así se tiene que si queremos observar un detalle específico, detectar la forma, localizar alguna singularidad, o deseamos una percepción rápida, los datos se procesan obteniéndose el escantillón adecuado. Para procesar una imagen digital es necesario tomarla, digitalizarla, almacenarla, y hacer los escantillones. Una imagen se obtiene mediante algún transductor, su selección principalmente depende de cuatro factores: velocidad de digitalización, resolución, costo, y el nivel de cuantización.

Actualmente se disponen de tres transductores denominados como:

- 1) VIDICON
- 11) DCA
- 111) OPTICRAM

6-1.1 VIDICON

1) VIDICON, es un tubo al vacío empleado en las cámaras de televisión y en videograbadoras, con un funcionamiento inverso al TRC. Una cubierta fotosensitiva en el interior del tubo se barre horizontal y verticalmente por un haz de electrones, la cantidad de corriente que fluye por el haz, es proporcional a la luz incidente en cada uno de los píxeles, esta corriente representa un valor analógico por píxel, y se pasa a un CA/D para guardarse en memoria. Para enfocar la imagen en un vidicon se emplea el campo magnético de la bobina de enfoque, principio usado en el microscopio electrónico.

Existe un valor binario por píxel, para cada cuadro, esto es si la imagen es monocromática. El número de bits de resolución del CA/D determina los niveles de cuantización del cuadro, calculándose en base a:

$$N_c = 2^n$$

Ahora si la aplicación requiere imágenes cromáticas, el proceso se complica debido a que es necesario un CA/D por cada cañón de color.

Un transductor de este tipo es relativamente caro, lo mismo que el hardware para digitalizar. En general el vidicon no se usa en cibernética, y al ser comparado con los dispositivos de estado sólido tiene más poder resolutivo, a expensas de un mayor peso, más consumo, es voluminoso, y delicado.

En la figura 6.1-1 se muestra un esquema básico del vidicon.

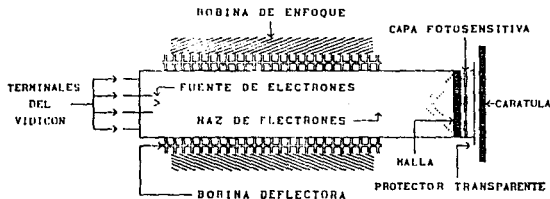


Figura 6.1-1 Diagrama Básico del Vidicon.

6-1.2 DISPOSITIVO DE CARGA-ACOPLADA

11) CCD, Charge-Coupled Device, su equivalente al español es Dispositivo de Carga-Acoplada, o DCA. Transductor basado en registros de corrimiento a lo largo de un material semiconductor. La estructura básica es un sustrato tipo P, una capa aislante, y compuertas aisladas entre sí. Funcionando de la manera siguiente: si la compuerta es hecha positiva con respecto al sustrato, una carga de electrones es inyectada en la región bajo la compuerta manteniéndose ahí. Aplicando señales de reloj a las compuertas, la carga almacenada puede ser desplazada hacia la compuerta adyacente, de esta manera un DCA puede funcionar como un registro de corrimiento, ya sea analógico, o digital.

Para hacer un sensor de imagen, varios cientos de DCA son puestos en paralelo en el mismo chip. Un fotodiodo se coloca en cada una de las compuertas, y la luz incidente en cada uno de ellos inyecta una carga eléctrica bajo su compuerta, una lente enfoca la imagen por tomarse. La carga proporcionada por el fotodiodo es proporcional a la luz incidente sobre el mismo. Ahora, todas las cargas pueden ser desplazadas en una dirección hacia afuera para leer los valores de cada pel. Una mejora a este sistema se logra mediante la siguiente estrategia: alternando los registros de desplazamiento de los fotodiodos iluminados, con los no iluminados, la información, de cada línea de rastreo se desplaza en paralelo desde el registro de los iluminados hacia los no iluminados, lográndose la salida de datos en serie. Esta es una gran ventaja, ya que la transmisión de datos en serie solo necesita una línea conductora y la señal de reloj, a diferencia de la transmisión en paralelo, que necesita una línea por cada bit.

Los datos proporcionados por un transductor hecho con los DCA, son muestras discretas, pero analógicas, y la razón es de que la salida es proporcional a la carga existente bajo cada compuerta. Para obtener un perceptor partiendo de arreglo como el anterior, es necesario digitalizar la imagen, obteniéndose imágenes con diferentes niveles de gris. Existen dos maneras, la primera es mediante una interface CA/D, la otra forma es mediante un Schmitt trigger, o un dispositivo isomorfo; con un detector de nivel se logran salidas binarias.

En muchas aplicaciones de cibernética es suficiente tener salidas de 1 ó 0, para cada pel, y así obtener un jull rápido de comparar con el escantillón del buffer; un perceptor de este tipo es más barato, ligero y robusto que un vidicon, y además el hardware e interface son relativamente sencillos.

La figura 6.1-2 muestra la estructura del dispositivo de carga acoplada.

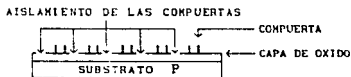
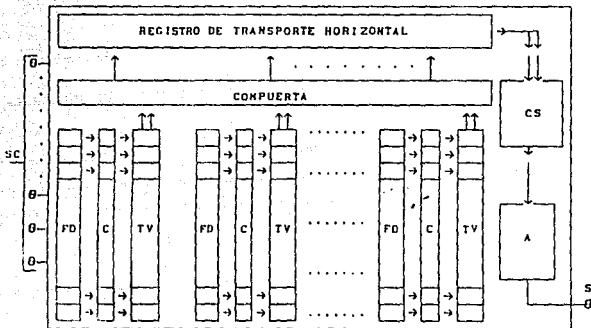


Figura 6.1-2 Estructura Básica de un DCA.

Existen tres resoluciones para un DCA y son: 32X32 para un nivel bajo, para un nivel medio es de 256X256. Los dispositivos de alta resolución existentes son de 480X380, pero hay perceptores experimentales de 1024X1024. Es posible partiendo de la estructura del DCA, lograr un perceptor visual por medio de un arreglo de la forma mostrada en la figura 6.1-3.

Figura 6.1-3 Estructura de un Perceptor Mediante Varios DCA



- SC: SEÑALES DE CONTROL
 FD: FOTODIODOS
 C: COMPUERTA
 TV: REGISTRO DE TRANSPORTE VERTICAL
 CS: COMPUERTA DE SALIDA
 A: AMPLIFICADOR
 S: SALIDA

6-1.3 OPTICRAM

111) OPTICRAM, transductor que proporciona directamente salida digital binaria para todos los casos. Su nombre proviene de OPTIC y RAM, traducido como RAM óptica. Perceptor barato y de fácil interface con las computadoras comunes, empleándose en aplicaciones simples de los autómatas.

Su funcionamiento se basa en una RAM dinámica de 64 Kbit con una cubierta protectora de cristal, y una lente para enfocar la imagen sobre un arreglo de capacitores. Las 65,536 celdas de almacenamiento se disponen en dos arreglos de 128X256 capacitores, funcionando cada celda como un pel. Debe considerarse que existe una zona muerta de un ancho de 25 celdas entre cada uno de los arreglos, y al usarse juntos debe considerarse esta zona.

Cuando se trata con datos almacenados en una RAM dinámica y esta se usa como memoria, estamos obligados a refrescar estos datos, ahora si es iluminada una celda de este dispositivo, el capacitor se descarga más rápido que si no lo estuviera, por lo que para usarlo como perceptor hay que cargar todas las celdas a un nivel lógico de 1, después de un tiempo se lee el nivel de cada celda. Todas las celdas que mantienen un nivel de 1, representan un pel negro. Y todas las celdas que tengan un nivel de 0, serán equivalentes a un pel blanco. Es importante notar que una lógica Booleana de este tipo puede considerarse de lógica negativa, y para usarse en los sistemas digitales convencionales, es necesario invertir cada bit del OPTICRAM.

La sensibilidad a la luz se ajusta variando el tiempo de lectura a partir de tener cargadas todas las celdas a 1, hasta que es leído el valor final, esto implica que en lugares con mucha iluminación el tiempo de espera es menor, este perceptor se ha hecho muy popular ya que existen tarjetas para lograr la interface con computadoras personales.

Las tarjetas tienen la lógica programada y alambrada necesaria para desplegar las imágenes en el TRC del sistema de cómputo, y se guardan los datos en los sistemas de almacenamiento no volátil.

Posteriormente se puede practicar mediante programas ya elaborados, o hechos por el usuario, diferentes estrategias algoritmos ideas y combinaciones para lograr escantillones que representen los características singulares de la imagen original. Los escantillones almacenados en el buffer de cuadros son la referencia para después comparar con el Juil del perceptor, y partiendo de la base de que si el Juil es igual al escantillón, se pretende de que la imagen tomada pertenece a un objeto ya definido para el sistema cibernético. Desde aquí pueden existir varios caminos a seguir, dependiendo de alguna aplicación específica, se puede si la imagen está definida evitarla o intentar tomarla, calcular su distancia, o preguntar que hacer con ella, en caso contrario puede ignorarse o procesarla y almacenarla. Debe notarse que el proceso de cuadros está limitado por el ingenio del diseñador.

6-2 IMÁGENES DIGITALIZADAS CON ANIMACIÓN

La animación es el proceso de crear imágenes que parezcan moverse, lo cierto es que estas no se desplazan en realidad, lo que hacen es basarse a una característica del ojo humano conocida como persistencia visual, la cual se refiere a que si un objeto se desplaza con una frecuencia mayor a 20 veces por segundo, este tiende a verse borroso. El proceso es el siguiente: una imagen recogida por el ojo se mantiene por más tiempo en el cerebro que en la retina, por consiguiente si el cerebro está reteniendo una imagen, antes de que este la pierda, se le añade una segunda imagen, ambas se combinan y dan la ilusión de movimiento. Se nota que la persistencia es de aproximadamente 50 ms, y partiendo de este dato se calcula el número de imágenes necesarias para crear la ilusión. Por lo que se tiene que $1s/50ms = 20$ c/s. Es obligado dar una tolerancia para no causar efectos estroboscópicos, y por norma el número de los cuadros/segundo, es de 24. Gracias al fenómeno de persistencia visual, a las señales luminosas no se les digitaliza como al audio. Aquí solo son necesarias 24 muestras/seg.

Si se intentase darle a la luz un criterio de muestreo del doble de la frecuencia máxima a digitalizar como en audio, se llega a tres conclusiones:

- i) Se necesitarían almacenar 600 Tera-cuadros/seg, en base a que $\lambda=1\mu$ para la luz. Calculando su frecuencia $f = c/\lambda$; 300 THz.
- ii) No existen CA/D con la velocidad de conversión necesaria.
- iii) De ninguna manera se pueden obtener imágenes en movimiento bajo los fundamentos anteriores.

Hay que estar agradecidos con la persistencia visual, ya que simplifica el trabajo de digitalizar imágenes, e hizo realidad el cine y televisión.

En esta parte se fundamentara como hacer imágenes digitales con movimiento, y además se explicará la razón de porque no es factible usar imágenes animadas en los sistemas cibernéticos.

Una imagen de computadora esta hecha por cientos o miles de peles, tal como lo esta la imagen de un receptor de television, en la formación de esta lo que se hace es rastrear todos los peles de algún cuadro con el fin de saber que objetos hay, y donde se encuentran estos, desafortunadamente cada pel no proporciona mucha información, lo único que indica es la intensidad promedio de la luz, y su posición dentro de la escena. Ahora convertir estos valores en una imagen real no es una tarea facil. Realmente cuando son necesarias imágenes repetitivas la animación se simplifica, como en el caso de los videojuegos, simuladores de vuelo, procesos químicos, biológicos, y los vuelos espaciales.

Se fundamentara la forma en que se produce cada cuadro, tanto si la imagen es real y tomada por cualquiera de los transductores, o si esta es producto del ingenio de algún artista de computadora. Primero es necesario calcular los datos digitales para cada buffer por almacenar, tomando como base cuadros con una resolución comparable a los televisores, se tiene un cuadro de 525X525 peles con 256 niveles de cuantización, necesitándose 275.625 Kbytes. Para una imagen cromática los datos por almacenar son mayores, y las razones de la capacidad necesaria por buffer, se presentan a continuación. Imagíñese una imagen tonalizada, entonces existen tres cañones de color, y de aquí tres CA/D son necesarios. Propongáñse CA/D de 4 bits, entonces se tiene que: $N_c = 2^4$ para cada uno de los CA pertenecientes a cada cañón RGB. En conclusión la cantidad de bytes necesarios para tener una imagen con las características anteriores es: 413.4375 Kbytes, que posee una resolución media y una paleta de 4.096 colores.

Debe notarse que no es práctico utilizar un sistema como el anterior para ser usado en cibernética, por la gran cantidad de datos que deben almacenarse considerando que el sistema cibernético necesita tomar decisiones, en base a los datos que recibe de su ambiente de trabajo, y deba compararlos con el escantillón de su base de datos. Actualmente no es posible procesar esa información en segundos tal como lo necesitaría un automatá con una percepción de tal magnitud. En primer lugar ¿En donde almacenar tantos datos, y además que este método posea una velocidad de acceso rápida?, y si por si esto fuera poco, ¿Como llegar directamente al cuadro requerido sin leer todos los que le preceden?. Y todavía otro problema grave, como poder rápidamente a lo más en segundos, comparar una imagen dada, con las almacenadas en el buffer.

Los argumentos anteriores son validos para uno y solo un cuadro, para crear el efecto de movimiento es necesario disponer al menos de 24 c/s, en base a las normas cinematográficas, o de 30 c/s para la televisión. Los argumentos anteriores son suficientes para restringir la animación en los automatás.

Para dar una idea de todo el procesamiento de datos que esto representa, se tiene que para hacer un minuto de imágenes en la serie de STAR Trek-II, la compañía Lucasfilm Ltd tardó cinco meses en lograrlo. Es bueno comentar que incluso para computadoras especiales para tales tareas, tardan de 5 a 10 minutos para procesar cada cuadro, y son computadoras cuyo precio oscila entre los US 160,000 para una DEC VAX 780, el lograr cinco minutos de imágenes con movimiento se lleva 50 días de 24 horas, sin interrumpir el proceso de diez minutos por imagen. Estas máquinas usan la técnica conocida como procesadores de vectores, el principio es el siguiente: se usa un μP para representar una parte u objeto determinado de la imagen, poniéndose a funcionar todos en paralelo, principio usado por la CRAY X-MP, de Cray Research. Computadora capaz de efectuar de 100 a 200 millones de instrucciones de punto flotante por segundo, y cuesta solamente de 15 a 200 millones de dólares.

En este momento se podría dudar de la validez de tales argumentos tomando de base a los videojuegos, los cuales con relativamente pocos datos y memoria, logran imágenes en movimiento.

Primero, basándose en la psicología de los colores, se hacen los juegos muy contrastantes para crear la ilusión de que son muchas las tonalidades.

Segundo, los cuadros son repetitivos, de tal manera que hacen un cuadro y el efecto de movimiento es creado repitiéndolo varias veces en diferentes lugares del juego, solamente cambiando el tamaño y los colores.

Tercero, usan estrategias basadas en transformaciones básicas: translación, escalamiento y rotación.

Translación, esta transformación desplaza un objeto de la imagen a una nueva posición sin alterar su forma, mediante las sencillas relaciones:

$$X_1 = X_0 + K_x \quad Y_1 = Y_0 + K_y$$

Escalamiento, usado para aumentar o reducir las dimensiones de algún objeto, esta transformación hace que los objetos se alejen o acerquen mediante la multiplicación de sus coordenadas por una constante:

$$X_1 = X_0(K_x) \quad Y_1 = Y_0(K_y) \quad \text{Para no deformar la imagen} \Rightarrow K_x = K_y$$

Rotación, mediante las funciones trigonométricas Seno y Coseno se rota una imagen o parte de esta:

$$X_1 = X_0(\text{Cos}\gamma) - Y_0(\text{Sen}\gamma) \quad Y_1 = X_0(\text{Sen}\gamma) + Y_0(\text{Cos}\gamma)$$

6-3 ESTRATEGIAS Y ALGORITMOS DE PERCEPCION

Los argumentos anteriores son suficientes para explicar el porque no es muy común el uso imágenes con movimiento en cibernética. Ahora se tratará con la percepción de imágenes en los autómatas. Esta se refiere al reconocimiento de objetos, y el principio básico es el de hacer un escantillón de referencia el cual se almacena en un buffer. Despues este es comparado con el juil de la imagen tomada por el receptor del sistema cibernético, se considera que si el escantillon y el juil son iguales, se presume entonces que la imagen procesada y la almacenada en el banco de datos pertenecen al mismo objeto.

Esto no siempre es así, ya que para un autómatas algunas veces una rebanada de piña, será igual a una pelota, a la luna, y en general todo objeto de figura circunformata. Esto último no es mucho problema si todo lo que deba "ver" el autómatas, es seleccionado para evitar confusiones al obtener los datos de su ambiente de trabajo.

Considérense dos enfoques para el reconocimiento de objetos, cada uno de se basa en principios diferentes, de ninguna manera son infalibles, y además no es posible afirmar que uno sea mejor que el otro. Cada aplicación específica tendrá una estrategia adecuada para hacer el proceso de las imágenes, y esta estrategia puede ser la combinación de diferentes enfoques, algoritmos o técnicas de iluminación. Las dos técnicas básicas empleadas en el reconocimiento de objetos son:

- 1) Análisis Regional, se refiere al reconocimiento de los objetos mediante el agrupamiento de regiones de peles de valores muy cercanos a un valor preestablecido, existiendo dos enfoques: el análisis de contorno y el de frontera.
- 11) Detección de Aristas, contrastando con la estrategia anterior, en este lo que se hace es localizar aristas con fundamento en que las aristas de un objeto se encuentran en la región donde los peles sufren un cambio abrupto de valor.

6-3.1 ANÁLISIS REGIONAL

El principio es muy simple, las regiones de peles parecidos son agrupados para formar un objeto. Generalmente una imagen es rastreada de la parte superior a la inferior y comparándose cada pel con su vecindad. Si los peles adyacentes son similares, se presume que todos pertenecen a un mismo objeto, y de manera contraria, los peles pertenecen a otro objeto o son parte del fondo.

Es muy empleado el análisis regional binario, aquí lo que se hace es obtener imágenes de objetos con fondos altamente contrastantes, posteriormente se hace una conversión de tal manera que solamente se tenga una escala con dos niveles de cuantización. A este proceso se le llamará de transición debido a que todo valor de intensidad superior a un valor predeterminado se dejan como un nivel de gris, para el caso contrario, toma el otro valor. Al valor predeterminado donde ocurrirá el cambio binario se llamará nivel de transición, denotado mediante T. Es obligado en una estrategia de este tipo, que todos los objetos de la imagen tengan un fondo altamente contrastante, la razón es de que los objetos tendrán un nivel de gris y el fondo tendrá el otro. Una vez obtenida la imagen binaria, el paso siguiente es agrupar todos los peles iguales para formar el escantillón. Para que esta técnica funcione lo mejor posible deben cumplirse las siguientes condiciones:

- 1) La imagen debe tomarse siempre con la misma orientación y perspectiva.
- 11) Debe existir un alto contraste objeto-fondo.
- 111) Para mantener este contraste, la luz debe controlarse y ser la misma.

Tales condiciones podrían convertirse en restricciones, pero ciertamente esto no es un problema tan grave, en una línea de producción la luz y las piezas se controlan fácilmente y las cámaras están fijas en un mismo lugar.

Se concluye que un análisis regional binario es útil y confiable para una aplicación industrial. La razón de una técnica de este tipo es su sencillez.

¿Que tan efectiva es para una aplicación especial?, depende mucho del ingenio del diseñador del autómata. Para autómatas domésticos es buena idea el uso de region binaria para localizar una perilla negra en una puerta blanca. Es bueno también "enseñarle" como llegar a su "casa", mediante un camino blanco y borde negro.

Existe actualmente un autómata producto de Sumitomo Electric Co., capaz de tocar melodías en un órgano a dos manos y pies con una velocidad de 15 teclas por segundo, basándose en un enfoque de análisis regional binario. Para poder apreciar lo complejo que es diseñar, fabricar, y programar una máquina de tal tipo, es necesario notar que este autómata usa para controlar sus funciones 17 μ P de 16 bits y además 50 μ C de 8 bits.

En el procesador de imágenes empleado en el presente trabajo, los cuadros originales tienen 256 niveles de cuantización y una resolución de 128X128, sin embargo debe notarse que las impresiones que se mostrarán en todos los procesos solo tendrán 4 niveles de gris, y las razones técnicas se presentan a continuación. La RAM de gráficos de una PC-XT es de 16 Kbytes si usamos HGC, MDA, o CGA, al usar el modo de alta resolución de 640X200, es posible desplegar 1 de 16 niveles de gris. Pero al usarse el modo de resolución media de 320X200 es posible mostrar 4 de 16 niveles de cuantización. La razón es la siguiente:

$$(64 \text{ kbits}) / (\# \text{bits}) = 16 \text{ Kbytes} \quad \# \text{bits} = 16 \text{ Kbytes} / 64 \text{ Kbits} = 2$$

Por lo que bajo estas restricciones de resolución y RAM solo son disponibles 2 bits para especificar los niveles de cuantización: $N_c = 2^2$

Es posible mostrar 64 colores con una VGA, pero esta solo es compatible con las PC-AT. Entonces para una CGA el rango y los colores desplegados serán:

RANGO DEL VALOR DEL PIXEL	COLOR MOSTRADO EN EL MONITOR
De 000 a 063	NEGRO
De 064 a 127	MAGENTA
De 128 a 191	CYAN
De 192 a 255	BLANCO

Después de haber fundamentado las restricciones cromáticas de una PC-XT, se procederá al análisis de las imágenes. El cuadro se define por la función siguiente: ${}^n N_g(x,y)$, donde N_g representa el nivel de gris del pixel de coordenadas (x,y) , y n es el número del cuadro al que nos referimos.

Para el análisis binario, definiremos matemáticamente una relación existente entre el nivel de transición T , la imagen, y la salida binaria ${}^n b(x,y)$.

$${}^n b(x,y) = \begin{cases} N_{g1} & \text{Si } {}^n N_g(x,y) > T \\ N_{g0} & \text{Si } {}^n N_g(x,y) \leq T \end{cases} \quad 0 \leq T \leq N_c \quad (6-3.1)$$

Una aplicación industrial muy común es la de tomar piezas para un proceso de ensamble. Por lo que se presentarán los dos enfoques del análisis regional.

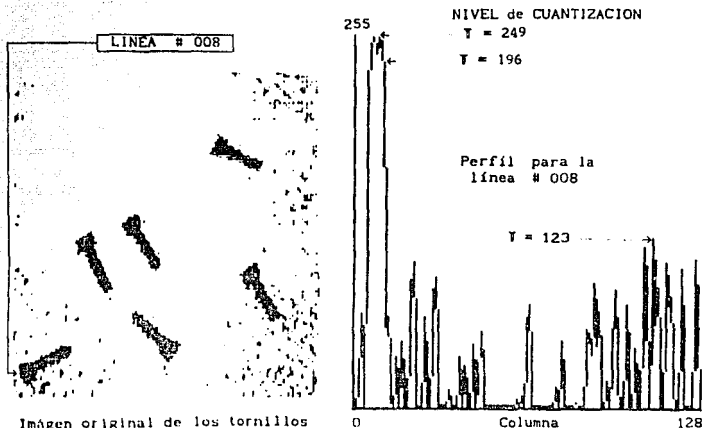
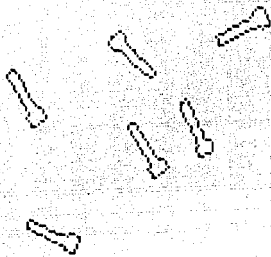
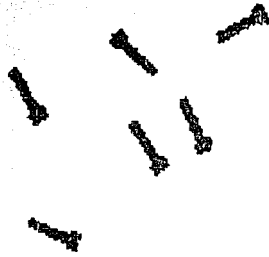


Imagen original de los tornillos

La imagen original es representativa de unos tornillos sobre un banco de trabajo, es de notarse que la condición de un alto contraste entre el fondo y pieza se cumple. Esto se nota inmediatamente a partir del perfil del cuadro, que es una gráfica de la intensidad de cada pixel con respecto a su posición en cada una de las 128 columnas para la línea indicada por la flecha. Debe notarse que la intensidad luminosa del tornillo es considerablemente más alta que el fondo. A partir del perfil se selecciona el nivel de transición T , para detectar al tornillo.

Obsérvese que si el nivel de transición es menor a 123, en la imagen procesada aparecerá parte del fondo. Por otra parte debe notarse que si es seleccionado un nivel mayor a 249, nada aparecerá en el escantillon, ya que arriba de este número no existen valores para el perfil. Ahora, teóricamente tenemos que: $123 \leq T \leq 249$, pero al momento del proceso nos damos cuenta que en la realidad el rango es: $123 \leq T \leq 195$, esto se debe a que para el rango de $196 \leq T \leq 249$ el cuadro bajo proceso mostrará a los tornillos incompletos o fraccionados. Seleccionando el promedio tenemos que $T = 150$, con lo que se asegura que en el escantillon solo aparecerán las piezas de interés, sin faltarles detalles o partes importantes, y además no será detectado el fondo.

Con este valor de T , ahora se procesa la imagen obteniéndose su cuadro equivalente para los dos métodos de análisis regional binario, apreciándose la diferencia básica de los dos enfoques mediante las siguientes figuras.

Contorno con $T = 159$ Frontera con $T = 159$

Se aprecia claramente que en el cuadro resultante de la rutina para el contorno, solamente aparece la periferia de los tornillos, sin aparecer parte alguna de la mesa de trabajo. Para el otro enfoque nótese que solamente son detectadas las piezas, evitándose el fondo o cualquier otro objeto. Estas son mostradas como siluetas debido a que los pixeles que se localizan dentro de la frontera de los tornillos se consideran parte de estos, de otra manera los peles proceden de la mesa.

6-3.2 DETECCIÓN DE ARISTAS

Existen otros enfoques de percepción los cuales basan el reconocimiento de los objetos en detectar más bien sus aristas, y no en la forma. Es de suma importancia notar que la detección de aristas es parte del proceso conocido como segmentación, este subdivide la imagen del receptor en las partes u objetos presentes en el cuadro. La segmentación es uno de los elementos más importantes de los sistemas de visión usados en los autómatas. En esta etapa del procesamiento los objetos que nos interesa detectar son extraídos o seleccionados de la imagen original. Las rutinas de segmentación se basan en uno de dos principios básicos: similitud y discontinuidad. Cuando se habla de perceptores por transición y crecimiento de región, las bases parten del principio de similitud.

El enfoque de transición analizado anteriormente se basa en la detección de la similitud en intensidad. Para el caso ideal estas técnicas funcionan casi perfectamente para detectar los objetos de nuestro interés y separarlos de los otros elementos que aparecen en la escena. Cuando nos encontramos en la práctica, estas técnicas no cumplen con su cometido por varios motivos: el ruido, cambios de iluminación; y otros detalles que introducen discontinuidades en los objetos de la imagen.

En los casos cuando se usan estrategias basadas en las discontinuidades, es común emplear rutinas con base en la detección de las aristas. La idea básica es localizar cambios importantes en la vecindad de los peles. Este enfoque asume que los cambios en peles adyacentes ocurren en las aristas de los objetos de la imagen, detectándose por medio del gradiente.

Una vez que los puntos pertenecientes a las aristas son localizados, pueden unirse para formar líneas continuas que representan las aristas del objeto bajo proceso. Esto no es una tarea fácil, y el procesamiento posee las siguientes características:

- 1) Generalmente no es fácil localizar todas las aristas de una imagen, ya que muchas partes que sobresalen de un objeto pueden causar este efecto, la textura, sombreado, y variaciones de iluminación pueden producirlo.
- 11) Es común que al intentar enlazar los puntos de las aristas esto no se logre en su totalidad, la razón es de que no todos estos puntos tienen la suficiente intensidad para ser detectados, esto hace que las líneas del gradiente aparezcan discontinuas. Consecuentemente, algunas veces es necesario enlazarlas mediante pequeñas cadenas de puntos.

Una decisión importante es la siguiente: ¿Cuándo se deben enlazar líneas que se muestran discontinuas y cuándo no?

Existen actualmente tres detectores de aristas y cada uno lleva el nombre de quien lo desarrolló: Sobel, Prewitt, y Roberts. Aunque cada método se basa en el mismo principio, estos son ligeramente diferentes en cuanto al resultado.

Todos se basan en localizar las aristas por medio de la comparación de peles dentro de una vecindad proporcionando el gradiente de las aristas para cada objeto de la imagen. El gradiente indica que tan pronunciada está la arista para cada posición de la imagen. Realmente el detectar las aristas no ayuda mucho para lograr la separación del objeto de nuestro interés. Verdaderamente la segmentación es lograda mediante combinación del gradiente con otras ideas o rutinas.

Partiendo de un cuadro definido como ${}^nN_f(x,y)$, se tiene que para un punto en particular de coordenadas (ξ, θ) , lo denotaremos como ${}^nNg(\xi, \theta)$.

Del cálculo vectorial es sabido que el gradiente de una función $f(x,y)$ para una posición (ξ, θ) , está definido por un vector bidimensional de la forma:

$$G[f(\xi, \theta)] = \begin{bmatrix} G_{\xi} \\ G_{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial \xi} \\ \frac{\partial f}{\partial \theta} \end{bmatrix} \quad (6-3.2)$$

El vector G , apunta en dirección del máximo cociente de cambio de f , en la posición (ξ, θ) . Estamos interesados en la magnitud de tal vector, y no tanto en su dirección para lograr la detección de las aristas. Entonces es posible ahora definir el gradiente de la función f , cuando se aplica en los procesos de segmentación.

Para aplicaciones de perceptores lo llamaremos gradiente del cuadro, y es posible definirlo como:

$$G [{}^n N_g(\xi, \theta)]^2 = {}^n G_\xi^2 + {}^n G_\theta^2 = \left(\frac{\partial {}^n N_g}{\partial \xi} \right)^2 + \left(\frac{\partial {}^n N_g}{\partial \theta} \right)^2 \quad (6-3.3)$$

En la práctica se aproxima el gradiente por sus valores absolutos:

$$G [{}^n N_g(\xi, \theta)] \approx \| {}^n G_\xi \| + \| {}^n G_\theta \| \quad (6-3.4)$$

La forma de obtener el escantillón del gradiente de las aristas, es mediante (6-3.4). Existen diversos métodos de calcular derivadas, pero dos son básicos: metodos numéricos y analítico. La forma analítica queda descartada por el hecho de no conocer la forma explícita para ${}^n N_g(x, y)$. Los detectores de aristas mediante el gradiente se fundamentan en las relaciones siguientes:

$${}^n G_\xi = \frac{\partial {}^n N_g}{\partial \xi} = {}^n N_g(\xi, \theta) - {}^n N_g(\xi-1, \theta) \quad (6-3.5)$$

$${}^n G_\theta = \frac{\partial {}^n N_g}{\partial \theta} = {}^n N_g(\xi, \theta) - {}^n N_g(\xi, \theta-1) \quad (6-3.6)$$

Esta forma de obtener las parciales de ${}^n N_g(\xi, \theta)$, lo llamaremos diferencias de primer orden entre peles adyacentes.

Obtenemos un algoritmo ligeramente más complicado usando una vecindad de 3X3 peles con centro en (ξ, θ) . Por razones de espacio denominaremos la función del cuadro como: $f(\xi, \theta)$.

$$\begin{aligned} {}^n G_\xi &= [f(\xi+1, \theta-1) + 2f(\xi+1, \theta) + f(\xi+1, \theta+1)] - [f(\xi-1, \theta-1) + 2f(\xi-1, \theta) + f(\xi-1, \theta+1)] \\ &\rightarrow \frac{\partial {}^n N_g}{\partial \xi} = (f + 2g + h) - (a + 2b + c) \end{aligned} \quad (6-3.7)$$

$$\begin{aligned} {}^n G_\theta &= [f(\xi-1, \theta+1) + 2f(\xi, \theta+1) + f(\xi+1, \theta+1)] - [f(\xi-1, \theta-1) + 2f(\xi, \theta-1) + f(\xi+1, \theta-1)] \\ &\rightarrow \frac{\partial {}^n N_g}{\partial \theta} = (c + 2e + h) - (a + 2d + f) \end{aligned} \quad (6-3.8)$$

En la siguiente máscara se usan las letras a hasta la h, para representar las vecindades del punto (ξ, θ) dentro de una malla de 3×3 pixeles. Estas mallas son conocidas como operadores de Sobel.

a	b	c
d	(ξ, θ)	e
f	g	h

Vecindad de 3×3 para el píxel (ξ, θ)

-1	-2	-1
0	0	0
1	2	1

Máscara para calcular ${}^n G_{\xi}$

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

Máscara para calcular ${}^n G_{\theta}$

A partir de la vecindad de 3×3 , (6-3.7) y (6-3.8) se calcula el gradiente por medio de la intensidad luminosa de los píxeles pertenecientes a una vecindad.

Calculando el gradiente en una vecindad de 3×3 , en vez de usar las relaciones (6-3.5) y (6-3.6), se logra una menor sensibilidad al ruido. Es posible definir un gradiente digital para vecindades de $N \times N$, pero los operadores de 3×3 son comunes industrialmente por la razón de lograrse una buena velocidad computacional, y requerir reducido hardware.

Debe notarse que los píxeles cercanos a (ξ, θ) , tienen un peso de 2 para esta definición particular de derivada digital. La respuesta para los operadores de Sobel para cualquier píxel (ξ, θ) , se obtiene a partir de las relaciones (6-3.3) o (6-3.4). La aproximación del gradiente de toda la imagen se logra moviendo las máscaras a través de todos los píxeles pertenecientes al cuadro ${}^n W_{\theta}(x, y)$. El cuadro resultante de obtener el gradiente total es denotado por:

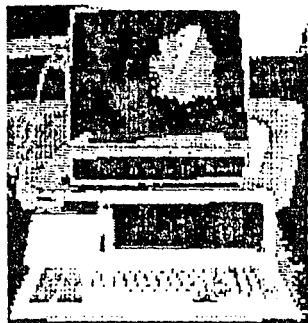
$${}^n G(x, y) = G[{}^n W_{\theta}(x, y)] \quad (6-4.9)$$

A continuación se muestra la imagen de una PC para comparar los resultados proporcionados por los diferentes detectores.

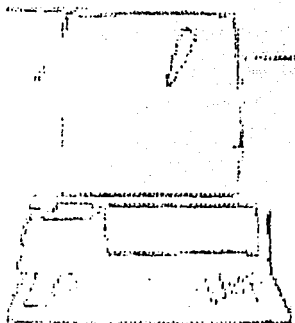
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

PERCEPCION DE IMAGENES EN LAS MAQUINAS

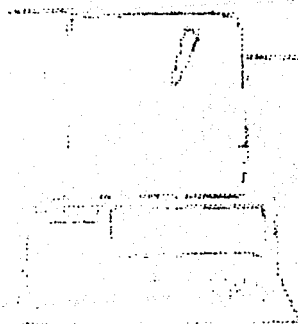


Cuadro de una PC



Detección de aristas por Sobel

Las figuras muestran que la diferencia de las tres rutinas es poco notoria.



Detección de aristas por Prewitt



Detección de aristas por Roberts

PERCEPCION DE IMAGENES EN LAS MAQUINAS

Mediante la relación (6-3.4), el nivel de transición, y con las relaciones (6-3.10), (6-3.11) se obtiene un detector de líneas rectas.

$$\| G[f(\alpha, \beta)] - G[f(\xi, \phi)] \| = \tau \quad (6-3.10)$$

$$\theta = \tan^{-1}[G\beta/G\alpha] ; \quad \phi = \tan^{-1}[G\phi/G\xi] \quad (6-3.11)$$

Se dice que un pixel de arista con coordenadas (ξ, ϕ) , dentro de una vecindad previamente definida, es similar en magnitud a otro pixel localizado en la posición (α, β) , si cumple con (6-3.10).

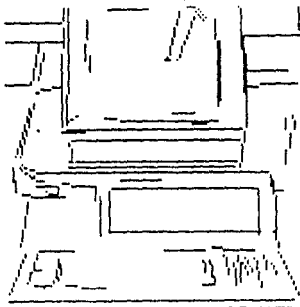
La dirección se define a partir de los ángulos de (6-3.11). Donde θ , y ϕ son ángulos medidos con respecto al eje x. Entonces se dice que un pixel de arista (ξ, ϕ) , tiene un ángulo similar al pixel (α, β) , si cumple con:

$$\| \theta - \phi \| < \angle \tau \quad (6-3.12)$$

Lográndose un detector binario de líneas rectas denotado por ${}^n C_b(x, y)$. Donde $\angle \tau$ es el ángulo de transición. Una estrategia como esta simplifica la comparación y conduce a menos errores.

Es importante decir que existen fundamentos para creer que un sistema basado en detectar las aristas, es parecido a la forma en que los animales perciben la localización y forma de los objetos.

El cuadro siguiente muestra el resultado de tal rutina para compararla con los resultados proporcionados por el gradiente.



Detector Binario de Líneas Rectas.

PERCEPCION DE IMAGENES EN LAS MAQUINAS

Se indicarán otras estrategias su funcionamiento básico, y se mostrará como dependiendo del tratamiento de la imagen principal se obtienen detalles o información no percibida originalmente.

Mejoramiento de la imagen: proceso que mejora los detalles del cuadro tratado mediante una rutina fundamentada en el Laplaciano. Bajo este proceso podemos mejorar la calidad de una imagen borrosa, así como mostrar aristas que no aparecen en el cuadro original. El Laplaciano de una función es un operador derivativo de segundo orden definido como:

$$\mathcal{L}[f(x,y)] = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \quad (6-3.13)$$

Para imágenes se define de la siguiente manera:

$$\mathcal{L}[f(\xi, \theta)] = [f(\xi+1, \theta) + f(\xi-1, \theta) + f(\xi, \theta+1) + f(\xi, \theta-1)] - 4[f(\xi, \theta)] \quad (6-3.14)$$

El proceso de la mejora de imagen, basado en (6-3.14), conduce a (6-3.15), denotada por: ${}^n M(\xi, \theta)$.

$${}^n M(\xi, \theta) = \| {}^n N_0(\xi, \theta) - \mathcal{L}[{}^n N_0(\xi, \theta)] \| \quad (6-3.15)$$

Las siguientes figuras muestran notable diferencia entre la imagen original y el cuadro obtenido por (6-3.15). Obsérvese el teclado con más detalles, y el monitor presentando aristas mejor definidas.

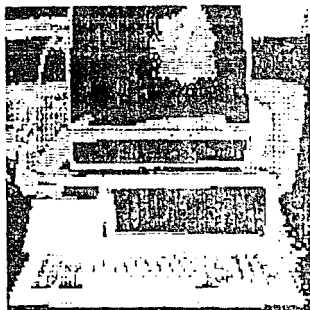
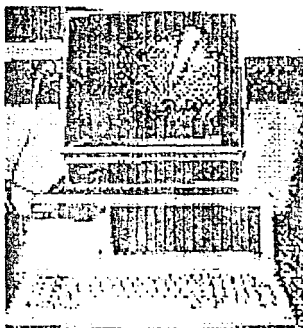
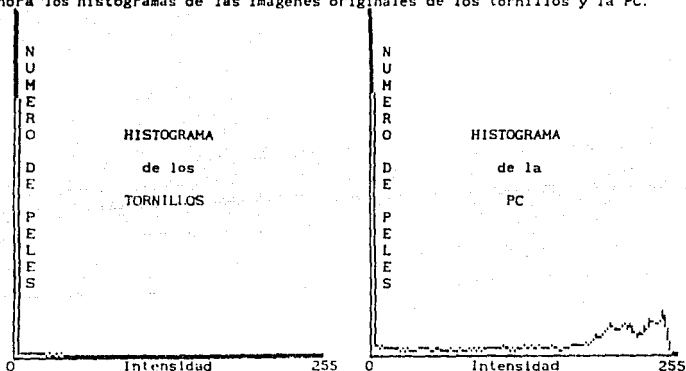


Imagen de la FC



Mejoramiento mediante el Laplaciano

Por otra parte, el histograma es una gráfica que muestra la distribución de las ocurrencias de la intensidad luminosa de toda una imagen. Considérense ahora los histogramas de las imágenes originales de los tornillos y la PC.



La diferencia entre las dos gráficas es bastante notoria, ya que para los tornillos se observa claramente que los píxeles con bajo nivel luminoso son los predominantes. Y como contraste, los peles de alta luminosidad son menos frecuentes.

Analizando la gráfica perteneciente a la computadora, es claro que el contraste no está tan bien definido, los peles que están en un rango luminoso que abarca de $0 \leq N_p \leq 5$ son los predominantes, y en el rango de $6 \leq N_p \leq 186$, la ocurrencia es menor. Finalmente para el rango de $187 \leq N_p \leq 242$, la distribución de píxeles es de un nivel intermedio. Un histograma como el anterior sugiere usar una transición múltiple, denotada por: $T_m(x,y)$.

Mostraremos la efectividad de tal estrategia mediante un proceso de imagen bien llevado. En el cuadro siguiente detectaremos claramente la ranura de inserción del disco flexible. Tal objetivo no fue logrado con ninguno de los procesos anteriores.

Este es un ejemplo muy claro de que mediante la segmentación se puede separar o localizar objetivos específicos de una imagen. Para localizar al slot, se siguió el proceso siguiente:

- i) En el sentido luminoso invertimos el cuadro original.
- ii) Aplicamos un detector de líneas rectas con transición múltiple.

El resultado obtenido se muestra en las siguientes figuras:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

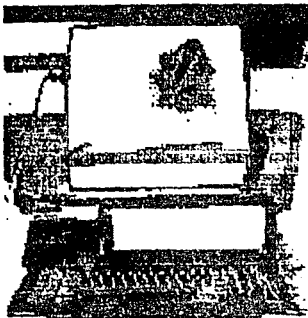


Imagen invertida de la PC

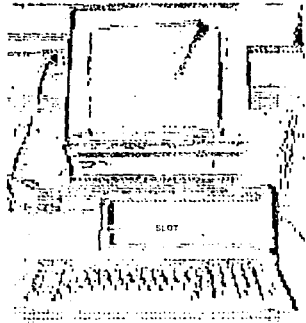


Imagen que muestra el slot

Diferentes factores producen el efecto de aristas inexistentes. Para darnos una idea de tal situación, y además mostrar que un proceso mal llevado conduce al fracaso, aplicaremos el gradiente al cuadro de los tornillos. El siguiente cuadro se obtuvo mediante el Roberts, es obvio que el contorno del tornillo no es el mejor, y además aparecen detalles pertenecientes al banco de trabajo, por supuesto que estos no son aristas. Los detalles que aparecen durante el proceso pueden causar confusión para el manipulador.



Cuadro de los tornillos obtenido mediante el Roberts.

Aplicando un proceso de transición binaria a la PC con $T = 150$:

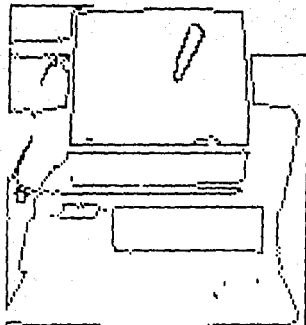


Imagen de la PC mediante transición binaria, $T = 150$

En imágenes degradadas por el ruido, la transición binaria proporciona buenos resultados tal como se muestra a continuación.

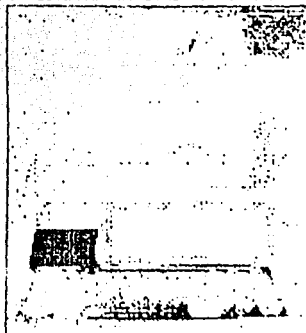
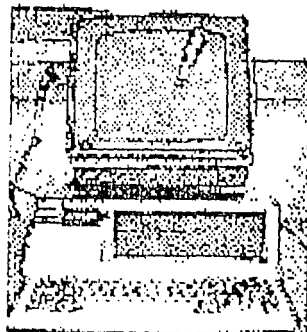


Imagen degradada



Cuadro con $T = 254$

Existen muchas otras ideas para el proceso de imágenes: sustracción, cálculo del logaritmo de la intensidad de los pels, contraste, promedio, operaciones booleanas; OR AND, y tantas otras como dicte el ingenio del diseñador.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

7-1 INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN LAS MAQUINAS

Los conceptos de control en manipuladores, visión, sentidos, síntesis de voz, y reconocimiento de patrones, tienen sus raíces en la Inteligencia artificial (IA). La IA trata de emular alguna forma de razonamiento, que comúnmente es el humano. Generalmente este trabajo es solucionado mediante alguna de las ramas de la Ingeniería en computación, sin embargo es conveniente destacar que la IA posee elementos de psicología, lingüística y matemáticas. En el caso de los manipuladores que deben tomar decisiones, fundamentan la IA en base a:

- 1) Solución de problemas, dado un conjunto de reglas y estrategias lógicas, una cadena manipuladora es capaz de tomar decisiones. El diseño de la lógica a seguir depende del problema a solucionar, y éste a su vez se resuelve particionando el problema total en pequeños bloques, dándole solución a cada bloque por separado. Un manipulador doméstico que se le encarge la tarea de traer el periódico, primero debe mostrarsele que objeto debe traer, segundo la ubicación más común donde se encuentra el periódico, tercero cual es el camino para llegar al lugar donde se espera esté el objeto en cuestión, y finalmente el lugar al cual debe entregarlo. Es claro que si en alguno de los pasos anteriores se presentan situaciones no definidas para el sistema manipulador, éste no logrará la tarea que le fué asignada. Por ejemplo si en la trayectoria definida originalmente no se le indicó la presencia de una puerta que podría estar abierta o cerrada, es claro que nunca logrará su tarea satisfactoriamente. Estas situaciones conducen a la toma de decisiones por parte del manipulador, donde es posible dictarle alternativas de solución para lograr sus tareas cuando se presentan hechos singulares. En el caso de la puerta que puede estar cerrada o abierta en el trayecto del manipulador, se le deberá indicar el punto donde está la puerta, si ésta está abierta, debe seguir con su trayectoria. Y en el caso de estar cerrada, indicar en su conjunto de reglas la estrategia y decisiones a seguir para cumplir con su tarea.
- 11) Sistemas expertos, esto se refiere al desarrollo de sistemas que aparentan un comportamiento humano en campos específicos, a través de un diálogo con un operador humano. Un sistema experto recomendará las pruebas por efectuarse y hará las preguntas apropiadas, antes de hacer conclusiones, para finalmente dar la solución al problema que se le presente. El fundamento de los sistemas expertos es en base a las reglas propuestas por un humano, experto en la solución de problemas en un área de aplicación específica.
- 111) Aprendizaje, uno de los atributos de la Inteligencia artificial es el de la capacidad de aprender en base a la experiencia. Esto se refiere a que la máquina en base a los datos que tiene del pasado almacenados en un banco de datos, y un sistema experto apropiado, puede tomar decisiones.
- 1v) Visión, la meta más importante de un sistema de visión, es el de permitir un análisis e identificación de objetos.

7-2 INGENIERIA DEL CONOCIMIENTO Y SISTEMAS EXPERTOS

La mayoría de las técnicas de la IA son limitadas al compararse con el ser humano, e inclusive con los animales. Los sistemas de computación diseñados para ver imágenes, escuchar sonidos, y entender voces, son primitivos. Sin embargo, en otra área de la IA: el razonamiento en base a conocimientos en un dominio limitado, los programas de computadora no solo son comparables al ser humano, sino que en algunos casos pueden mejorarlo.

El programa de un sistema experto es diferente a los programas convencionales de computadora, por el hecho de que sus tareas no tienen soluciones algorítmicas, y debe hacer conclusiones en base a información incompleta o con incertidumbres. Los sistemas expertos tienen estructura modular, elaborándose con una colección enorme de información, mas que en técnicas sofisticadas de razonamiento. No todos los campos del conocimiento pueden ser resueltos por medio de un sistema experto, por lo que solamente los campos que poseen las siguientes características, pueden ser resueltos mediante la ingeniería del conocimiento.

- i) Debe existir al menos un ser humano experto en el área de aplicación, capaz de resolver todos los problemas que enfrentará el sistema.
- ii) Las principales habilidades del experto deben ser conocimiento especial, buen juicio y experiencia.
- iii) El experto debe proporcionar los métodos a emplear, así como las reglas para poder usar su conocimiento, experiencia y buen juicio.
- iv) El sistema debe tener un área de aplicación de dominio bien acotado.

Es común que algunas veces un sistema experto puede construirse, y no cumplir con los requisitos anteriores; por ejemplo las habilidades de varios expertos humanos, en vez de uno, son necesarias para resolver algún problema en particular. Los hechos y la información sobre un dominio en particular, pueden separarse de la estructura de control para la aplicación de los hechos, mientras que la otra parte del sistema es la base global de datos, asociada a un problema bien específico, su historia, y categoría.

Un sistema experto difiere de los programas convencionales de computadora en diversos aspectos importantes: en los programas convencionales, los conocimientos asociados a un problema y los métodos para usarlos, son entrelazados, de tal manera que es difícil cambiar el programa. Por otra parte en un sistema experto, existe una clara separación entre el conocimiento general acerca del problema (base de conocimiento), y la información de la falla que se presenta (datos de entrada), y los métodos para la aplicación del conocimiento general al problema que se presenta. Mediante esta clara separación, el programa puede cambiarse modificando la base de conocimientos, esto es particularmente verdad para sistemas basados en reglas, donde el sistema puede cambiarse mediante la simple adición o sustracción de reglas.

El enfoque mas común para representar el dominio del conocimiento es mediante las reglas de situaciónación, o reglas de si-entonces.

Un ejemplo del uso de las reglas de si-entonces, se muestra a continuación:

" SI la fuente de alimentación principal falla, Y una fuente de emergencia se tiene disponible, Y no existe motivo para que se produzca la falla, ENTONCES conecta la fuente de emergencia. "

Los sistemas basados en reglas funcionan aplicándolas directamente, notando la nueva situación, y aplicando nuevas reglas al resultado. Los pasos por seguir también pueden obtenerse mediante inferencia lógica, ya sea comenzando con la evidencia inicial de una situación, y lograr la solución, o proponiendo una hipótesis acerca de las posibles soluciones, hasta encontrar la evidencia, o una deducción de la evidencia existente, que apoye la hipótesis propuesta.

Uno de los sistemas expertos más empleados es Dendral, desarrollado a finales de los 60's por Edward A. Feigenbaum y Joshua Lederberg en la Universidad de Stanford, para generar representaciones estructurales de moléculas orgánicas a partir de datos del espectrograma de masas, mediante las reglas:

- i) Obtener restricciones de los datos.
- ii) Generar estructuras candidatas.
- iii) Predecir los espectrógrafos de masa para las candidatas.
- iv) Comparar los resultados con los datos.

El sistema anterior basado en reglas, muestra el enfoque de IA para la solución de problemas. El sistema Dendral ha sido usado por Químicos orgánicos durante más de 15 años, y es reconocido como un experto en análisis de masas-espectro. Otro sistema experto muy conocido en el campo médico, es el sistema MYCIN, desarrollado en la Universidad de Stanford por Edward Shortliffe a mediados de los 70's. Este es un sistema que diagnostica infecciones bacteriales, y recomienda la terapia a seguir. Las aplicaciones más comunes de los sistemas expertos, incluyen diagnóstico y prescripción médica, interpretación de datos químicos, síntesis química y biológica, exploración minera y petrolera, interpretación de señales, táctica militar, control de tráfico y defensa aérea, análisis de circuitos, diagnóstico de fallas en sistemas, selección de configuración en computadoras, reconocimiento de voz, instrucción ayudada por computadora, procesos de manufactura, y construcción de sistemas expertos.

En el uso de sistemas basados en reglas han aparecido restricciones debido a que no todos los conocimientos pueden estructurarse mediante relaciones empíricas, ya que estas tienden a esconder relaciones causales. La tendencia actual en los sistemas expertos es tener conocimientos acerca de la causalidad y su estructura, tales sistemas prometen ser más robustos que los sistemas comunes, y pueden conducir a un número mayor de respuestas correctas, que permite su uso en sistemas autónomos, y no solo su uso como ayudantes inteligentes. Otro cambio significativo es la creciente tendencia al desarrollo de sistemas no basados en reglas. Tales sistemas usan redes semánticas, marcos y otras estructuras para representar el conocimiento en modelados causales. Al proporcionar representaciones del conocimiento más apropiadas para un problema específico, tienden a simplificar el razonamiento requerido. Algunos otros sistemas emplean el enfoque de caja negra, combinados con partes basadas en reglas y otras no basadas en reglas, los cuales se complementan para lograr la solución, y cada segmento del programa contribuye con su experiencia en particular.

Se han propuesto otros modelos que no solo producen respuestas de "sí o no", sino que también después de un uso prolongado, muestran características de fatiga. Otros modelos tienen múltiples entradas y una salida. Los modelos de una neurona solo tienen aplicaciones académicas, ya que lo que se desea es formar toda una red de neuronas para aplicarlas en la IA. Con la integración a gran escala de neuronas artificiales, se logra una red. La red neuronal no está obligada a formarse mediante la integración de los modelos celulares formados por capacitores, resistencias y transistores, ya que para lograr el enlace de mil o más neuronas se necesitan dimensiones muy grandes. Un enfoque para lograr redes neuronales, es mediante aplicación de programas, como lo hacen los investigadores Roger Traub, de IBM, Richard Miles y Robert K. S. Wong, de la Universidad de Columbia, para simular la actividad de la corteza cerebral. Mediante este simulador se analizarán señales eléctricas producto de la actividad cerebral. Es de esperarse que a medida que el simulador sea perfeccionado, se logre un mejor modelo del cerebro para analizar enfermedades como la epilepsia, y se conozca como operan los medicamentos que estimulan favorablemente las disfunciones cerebrales.

Las redes neuronales son un nuevo método para agrupar y organizar el conocimiento. Como en todos los enfoques de la IA, la meta es hacer el conocimiento disponible para resolver nuevos problemas. Las redes aprenden usando ejemplos que ilustran la causa y efecto, a la red se le enseña mediante datos y soluciones a los problemas. De esta forma, la red aprende un mapeo matemático entre la causa y efecto, y de esta manera la red modela el sistema aprendido. Entonces el modelo aprendido puede ser usado en algún sistema experto para control, localizar fallas, mantenimiento, o predicción del comportamiento del sistema que está supervisando. El usuario necesita solamente definir el problema en términos de causa y efecto, y proporcionar a la red los datos necesarios que relacionan las reglas de causa-efecto. Por ejemplo en un sistema de control la causa es la acción de control, y el efecto serán los cambios en los estados del sistema. La representación de datos de la acción de control, es la sucesión de la salida del controlador a través del tiempo. Los estados del sistema, pueden representarse por las lecturas de los sensores que describen la evolución de temperaturas, flujos o presiones.

Todos los datos pueden ser acumulados en tiempo real, o leerse desde un archivo con datos anteriores, estos pueden representar un sistema que inicia su funcionamiento, o un sistema que ya tiene datos acumulados de un funcionamiento previo. Una ventaja adicional es de que el sistema puede ser reentrenado tantas veces sea necesario, lo cual conduce a un sistema adaptable que mejora el rendimiento. Esta característica de adaptación puede ser inicializada por un operario a un intervalo regular de tiempo, o cuando es alcanzado un nivel de error pre-establecido.

Conceptualmente las redes neuronales trabajan mediante reconocimiento de patrones. En sistemas de control, los patrones son la respuesta requerida del sistema para una acción de control en particular, para unos estados iniciales dados. Es claro que para la red neuronal el *¿porqué?* debo hacer esto, y no aquello, carece de importancia. La red solo necesita una causa repetitiva, su relación con el efecto, y los datos que ilustran tal relación. La red aprende relaciones complejas en una forma automática, por lo que el modelado, análisis estadístico, y la experimentación son minimizados. Si es necesario actualizar la red debido a cambios en el sistema, la red sencillamente re-aprende las nuevas relaciones existentes entre las causas y efectos.

7-4 DISEÑO DE UN SIMULADOR DE REFLEJO CONDICIONADO

El fisiólogo ruso Iván Petrovich Pavlov, es conocido por sus trabajos sobre la fisiología de la digestión y las actividades relacionadas a los reflejos condicionados. Investigando los procesos digestivos en animales superiores, logró establecer la base del conocimiento actual de las secreciones del aparato digestivo, y los fermentos que intervienen en la asimilación alimenticia.

En 1900 comenzó a efectuar importantes investigaciones sobre el sistema nervioso, y su relación con los procesos digestivos. Haciendo numerosos experimentos con perros, llegó a establecer que la salivación es un reflejo incondicional cuando lo causa el alimento en la boca; y es condicionado cuando la saliva es provocada por algún suceso que el animal relacione con la llegada de comida; un sonido, un gesto, un color determinado. De esta manera alterando los procesos psíquicos del animal bajo experimentación, llegó a importantes comprobaciones acerca de los impulsos en el sistema nervioso de los mamíferos.

El experimento más conocido que realizó Pavlov, es el del perro que recibía su alimento, y simultáneamente una excitación sonora mediante una campana. Es claro que la presencia del alimento causa la salivación del animal. Ahora, después de un cierto número de aplicaciones simultáneas de la combinación: campana-comida, el perro aprende a relacionar el sonido con su alimentación, lo cual causa la salivación, aún a pesar de no existir la comida que originalmente causaba la producción de saliva.

La relación no-condicionada entre: sonido-comida + salivación, se representa por la tabla de verdad 7.4-1. Una vez que se logra el condicionamiento en el animal, su comportamiento es descrito por la tabla 7.4-2. Resulta claro que las tablas anteriores pueden reducirse a su mínima expresión, mediante cualquier técnica de minimización Booleana. Una vez encontrada la relación lógica mínima del sistema, es posible implementarlo mediante lógica alamburada.

Procediendo con los razonamientos anteriores, se efectúa la minimización y su respectivo alamburado.

Timbre	Comida	Saliva
0	0	0
0	1	1
1	0	0
1	1	1

Tabla 7.4-1 Lógica del sistema no-condicionado.

Es trivial que la tabla anterior representa la salida de un separador:

$$\bar{T}C + TC = S$$

$$\rightarrow (\bar{T} + T)C = S$$

Finalmente $C = S$, después de reducir la función Booleana.

Ahora analicemos la tabla 7.4-2, correspondiente a un animal condicionado debido a la repetitiva acción Timbre-Comida.

Timbre	Comida	Saliva
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Tabla 7.4-2 Lógica del sistema condicionado.

En base a la tabla de verdad 7.4-2, se hace la siguiente minimización:

$$\bar{T}C + \bar{T}C + TC = S$$

$$\text{finalmente } \rightarrow T + C = S$$

De las tablas 7.4-1, y 7.4-2 se concluye que:

- 1) En el animal no-condicionado, la respuesta obedece solamente a la presencia de la comida, por lo que el sistema se comporta como un separador que solo depende del alimento.
- ii) En el animal ya condicionado, la salivación corresponde a la presencia de la comida o el timbre, es claro que su lógica es correspondiente a una compuerta OR.

Basados en las conclusiones i) y ii), se propone simular el sistema mediante una ALU, la cual antes del condicionamiento funciona como un separador. Ahora un contador descendente de 4 bits, detectará el número de veces que ocurre la acción simultánea del timbre, y la comida A_0 , indicada por el LED₀, resultando ambas como la salida F_0 indicada por el LED₁.

REFERENCIAS

- An Engineering Approach to Digital Design
William I. Fletcher
Prentice Hall, Inc., U.S.A.
- An Electronic Theory of the Brain
H. Fatms; C.D. Harris
Cybernetic Medicine X Year.
- Eyesight
Loren Helny
Robots, Etc. U.S.A.
- Hands-On, Introduction to ROBOTICS- The Manual for the XR-Series Robots
Sandhu, H.S.
Rhino Robots, Champaign, Ill , 1983.
- I.E.E.E. Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing
Vol. ASSP-24(6), 446-458.
- Industrial Robotics Technology, Programming, and Applications
Mikell P. Groover; Mitchell Weiss
Mc Graw Hill International U.S.A.
- Introduction to Physical System Modelling
P.E. Wellstead
Control Systems Centre, University of Manchester
Institute of Science and Technology U.K.
- Linear Algebra
Stephen H. Friedberg
Prentice Hall Inc., U.S.A.
- Questions and Answers About Medical Electronics
Edward J. Bukstein
Sam Books U.S.A.
- Robot Dynamics and Control
Mark W. Spong; M. Vidyasagar
John Wiley and Sons U.S.A.
- SC-01 Speech Synthesizer Data Sheet, Votrax; Troy Mich., 1980.
- The Handbook of Artificial Intelligence
William Kaufmann Inc., Los Altos Calif.
-